

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до проведення практичних занять
з дисципліни**

**НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
І ТЕХНОГЕННИЙ РИЗИК**

*(для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форм навчання
напряму підготовки 6.170202 – Охорона праці)*

Методичні вказівки до проведення практичних занять студентів з дисципліни «Надійність технічних систем і техногенний ризик» (для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форм навчання напряму підготовки 6.170202 – Охорона праці) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: В. Е. Абракітов, С. А. Грязнова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. – 83 с.

Укладачі: В. Е. Абракітов
С. А. Грязнова

Рецензент: канд. техн. наук, проф. Я. О. Серіков

Затверджено на засіданні кафедри «Охорона праці та безпека життєдіяльності», протокол № 5 від 22. 10. 2014

ЗМІСТ

1 ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НАДІЙНОСТІ.....	4
1.1 Зауваження за рішенням завдань.....	4
1.2 Критерії й кількісні характеристики надійності.....	4
1.3 Критерії надійності невідновлюваних виробів.....	5
1.4 Критерії надійності відновлюваних виробів.....	10
1.5 Приклади розв'язку завдань	16
2 ПРИКЛАДИ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ Й РИЗИКУ СИСТЕМ	28
2.1 Розрахунки надійності системи аспірації	28
2.2 Аналіз небезпек і ризиків зварювального цеху	32
2.2.1 Завдання й мета проведення аналізу ризику.....	32
2.2.2 Розрахунки надійності устаткування й ризику	35
2.3 Аналіз і розрахунки надійності й ризиків фарбувальної лінії	38
2.3.1 Розрахунки надійності	38
2.3.2 Розрахунки ризику травмування працівників.....	43
2.4 Розрахунки надійності й ризику системи вентиляції	46
2.4.1 Обґрунтування необхідності розрахунків надійності й ризиків	46
2.4.2 Визначення значень імовірності безвідмовної роботи.....	47
2.4.3 Аналіз надійності вентиляційних систем методом «дерева несправностей»	50
2.4.4 Розрахунки ймовірності заподіяння збитку здоров'ю.....	51
2.5 Аналіз надійності системи газопостачання устаткування	53
2.5.1 Опис системи газопостачання	53
2.5.2 Визначення ймовірності відмови системи газопостачання	55
2.5.3 Розрахунки ймовірності заподіяння збитку здоров'ю.....	59
2.6. Аналіз ризику вусорізної пилки	62
2.6.1 «Дерево несправностей» вусорізної пилки	62
2.6.2 Аналіз ризику травмування збирача конструкцій ПВХ при роботі з вусорізної пилкою.....	64
2.7 Аналіз ризику вальців	68
2.7.1 Аналіз надійності вальців методом побудови «дерева несправностей».....	68
2.7.2 Аналіз ризику травмування вальцювальника	71
КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ЗА КУРСОМ	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	76
ДОДАТКИ	77

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ НАДІЙНОСТІ

1.1 Зауваження за рішенням завдань

Відправною точкою розв'язання завдань по визначенню кількісних характеристик надійності можуть бути:

- 1) статистичні дані про відмови виробу;
- 2) відоме аналітичне вираження однієї якої-небудь характеристики.

При розв'язку завдань першої групи використовуються статистичні визначення кількісних характеристик надійності, при розв'язку завдань другої групи – імовірнісні визначення характеристик і аналітичні залежності між ними.

У цьому розділі при визначенні кількісних характеристик надійності технічних обладнань за статистичним даними про їхні відмови не завжди можливо оцінити вірогідність використовуваної інформації. Із цієї причини іноді в прикладах і завданнях вихідні дані про число випробуваних зразків і кількості відмов наводяться без обліку вимог до вірогідності одержуваних кількісних характеристик надійності.

1.2 Критерії й кількісні характеристики надійності

Критерієм надійності називається ознака (захід), по якій (якої) оцінюється надійність різних об'єктів (виробів). Критерії представляються у вигляді показників надійності, властивостей безвідмовності, довговічності, ремонтпридатності, збереженості й ін.

До числа найбільше широко застосовуваних критеріїв надійності відносяться *показники безвідмовності*:

- імовірність безвідмовної роботи протягом певного часу $P(t)$;
- гамма-процентний наробіток до відмови t_γ ;
- середній наробіток до відмови T_1 (для статистичних завдань \bar{T}_1);
- середній наробіток на відмову T (для статистичних завдань \bar{T});
- частота відмов $f(t)$;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$;
- параметр потоку відмов $\mu(t)$ і ін.

Характеристикою надійності будемо називати кількісне значення критерію надійності конкретного виробу.

Вибір кількісних характеристик надійності залежить від виду виробу.

Основні критерії надійності можна розділити на дві групи:

- критерії, що характеризують надійність невідновлюваних виробів;
- критерії, що характеризують надійність відновлюваних виробів (рис. 1.1).

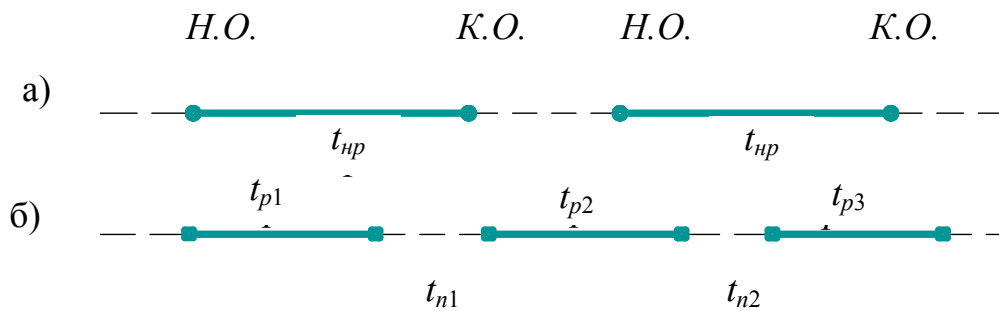


Рисунок 1.1 – Тимчасовий графік роботи невідновлюваних і відновлюваних виробів:

а – виріб невідновлюваний (t_{np} – час безперервної роботи, Н. О. – початок операції, К. О. – кінець операції); б – виріб відновлюваний (t_p – час справної роботи, t_n – час вимушеного простою)

1.3 Критерії надійності невідновлюваних виробів

Нехай на випробуванні перебуває N_0 об'єктів, і нехай випробування вважаються закінченими, якщо всі вони (об'єкти) відмовили. Замість зразків, що відмовили, відремонтовані або нові не ставляться. У таких випадках критеріями надійності виробів є:

- імовірність безвідмовної роботи $P(t)$;
- частота відмов $f(t)$;
- інтенсивність відмов $\lambda(t)$;
- середній наробіток до відмови T_1 (в [8] T_{cp}).

Імовірністю безвідмовної роботи (ІБР) називається **кількісний захід** того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу або в межах заданого наробітку не відбудеться жодного відмови.

Функція P – відносна тривалість безперервної справної роботи об'єкта до першої відмови, а аргумент t – час, за який потрібно визначити ІБР, отже, згідно з визначенням,

$$P(t) = P(T \geq t), t \geq 0, \quad (1.1)$$

де T – час роботи об'єкта від початку до першої відмови; t – час, протягом якого визначається ймовірність безвідмовної роботи.

Імовірність безвідмовної роботи зі статистичних даних про відмови оцінюється вираженням

$$\hat{P}(t) = (N_0 - n(t)) / N_0, \quad (1.2)$$

де $\hat{P}(t)$ – статистична оцінка ймовірності безвідмовної роботи; N_0 – число об'єктів на початку роботи (серії випробувань); $n(t)$ – число елементів, що відмовили, за час t .

На практиці, поряд із ІБР, визначають таку характеристику, як *імовірність відмови* $Q(t)$.

Імовірністю відмови називається *кількісна міра* того, що за певних умов експлуатації в заданому інтервалі часу виникає хоча б одна відмова.

Відмова й безвідмовна робота є подіями неспільними й протилежними, тому при $0 \leq t$

$$Q(t) = P(T < t), \quad Q(t) = 1 - P(t) = F(t), \quad (1.3)$$

де $Q(t) = F(t)$ – інтегральна функція розподілу випадкової величини.

Статистично ймовірність відмови рівна [3]:

$$\hat{Q}(t) = n(t)/N_0, \quad (1.4)$$

$$\hat{Q}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\sum_{i=1}^{t/\Delta t} n_i}{N_0},$$

де n_i – число несприятливих результатів;

N_0 – загальне число випробувань.

Якщо функція $Q(t)$ диференційована, то похідна від інтегральної функції розподілу – диференціальний закон (*щільність імовірності, щільність розподілу*) випадкової величини T – часу безвідмовної роботи:

$$f(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.5)$$

Частотою відмов за статистичним даними називається відношення числа елементів, що відмовили, в одиницю часу до первісного числа працюючих (випробовуваних) за умови, що всі вироби, що вийшли з ладу, не відновлюються. Згідно з визначенням,

$$\hat{f}(t) = n(\Delta t)/N_0 \Delta t \quad \text{або} \quad a(t) = n(\Delta t)/N_0 \Delta t, \quad (1.6)$$

де $n(\Delta t)$ – число елементів, що відмовили, в інтервалі часу від $(t - \Delta t)/2$ до $(t + \Delta t)/2$.

Частота відмов є щільність імовірності (або закон розподілу) часу роботи виробу до першої відмови. Тому

$$f(t) = -\frac{dP}{dt} = -P'(t) = \frac{dQ(t)}{dt} Q'(t),$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t) dt, \quad (1.7)$$

$$P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt. \quad (1.8)$$

Інтенсивністю відмов за статистичними даними називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до середнього числа виробів, що справно працюють у даний відрізок часу.

$$\hat{\lambda}(t) = n(\Delta t) / N_{cp} \cdot \Delta t, \quad (1.9)$$

де $N_{порівн} = (Ni + Ni_{+1})/2$ – середнє число справне працюючих виробів в інтервалі Δt ; Ni – число виробів, що справно працюють на початку інтервалу Δt ; Ni_{+1} – число виробів, що справно працюють наприкінці інтервалу Δt .

Інтенсивність відмов в імовірнісній оцінці є умовна щільність імовірності виникнення відмови об'єкта, обумовлена за умови, що до розглянутого моменту часу відмова не виникла.

Імовірнісну оцінку характеристики $\lambda(t)$ знаходять з вираження

$$\lambda(t) = f(t) / P(t) \quad (1.10)$$

або

$$f(t) = \lambda(t) P(t).$$

Інтенсивність відмов і ймовірність безвідмовної роботи зв'язані між собою залежністю

$$P(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}. \quad (1.11)$$

Середнім наробітком до першої відмови називається математичне очікування часу роботи об'єкта до відмови.

Математичне очікування середнього наробітку до відмови T_1 обчислюється через частоту відмов (щільність розподілу часу безвідмовної роботи):

$$m_t = T_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt. \quad (1.12)$$

Знаючи, що $t > 0$ і $P(0) = 1$, а $P(\infty) = 0$, визначають T_1 :

$$T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (1.13)$$

Середній наробіток до першої відмови, згідно зі статистичними даними про відмови, обчислюється по формулі

$$\hat{T}_1 = (\sum_{i=1}^m n_i t_i) / N_0, \quad (1.14)$$

де t_i – час безвідмовної роботи i -го зразка;

N_0 – число випробовуваних об'єктів.

Для визначення *середнього наробітку до першої відмови* необхідно знати моменти виходу з ладу всіх випробовуваних об'єктів. Тому для обчислення \hat{T}_1 користуватися даною формулою незручно. Маючи дані про кількість елементів

n_i , що вийшли з ладу, у кожному i -му інтервалі часу, середній наробіток до першої відмови краще визначати по рівнянню

$$\hat{T}_1 \approx (\sum_{i=1}^m n_i t_{cpi}) / N_0, \quad (1.15)$$

де t_{cp} і m знаходять по наступних формулах:

$$t_{cp} = (t_{i-1} + t_i) / 2, \quad m = t_k / \Delta t, \quad (1.16)$$

де t_{i-1} – час початку i -го інтервалу; t_i – час кінця i -го інтервалу; t_k – час, протягом якого вийшли з ладу всі елементи; $\Delta t = t_{i-1} - t_i$ – інтервал часу.

При розрахунках надійності технічного обладнання часто застосовуються закони розподілу: експонентний, усічений нормальний, Релею, гама, Вейбулла – Гнеденко, логарифмічно-нормальний. У таблиці 1.1 наведені формули для розрахунків кількісних характеристик об'єктів, що відповідні до перерахованих законів розподілу часу їх безвідмовної роботи.

Таблиця 1.1 – Інтенсивність відмов елементів

Закон розподілу	Частота відмов (щільність розподілу)	Імовірність безвідмовної роботи	Інтенсивність відмов	Середній наробі- ток до першої відмови
Експонентний	$\lambda e^{\lambda t}$	$e^{-\lambda t}$	$\lambda = \text{const}$	$\frac{1}{\lambda}$
Релею	$\frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{t}{\sigma^2}$	$\sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma$
Гама (при k цілому)	$e^{-\lambda_0 t}$	$e^{-\lambda_0 t}$	$\frac{\lambda_0 (\lambda_0 t)^{k-1}}{(k-1)! \sum_{i=0}^{k-1} \frac{(\lambda_0 t)^i}{i!}}$	$\frac{k}{\lambda_0}$
Вейбулла – Гнеденко	$\lambda_0 k t^{k-1} e^{-\lambda_0 t^k}$	$e^{-\lambda_0 t^k}$	$\lambda_0 k t^{k-1}$	$\frac{r(\frac{1}{k} + 1)}{\lambda_0^{\frac{1}{k}}}$
Усічений нормальний	$\frac{1}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right) \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}$	$\frac{F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}{F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}$	$\frac{e^{-\frac{(t-T)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma F\left(\frac{T_1 - t}{\sigma}\right)}}$	$T_1 + \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi F\left(\frac{T_1}{\sigma}\right)}} e^{\frac{T^2}{2\sigma^2}}$
Логарифмічно- нормальний	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}$	$\frac{1}{2} + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)$	$\frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} \frac{e^{\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)^2}}{0,5 + \Phi\left(\frac{\mu - \ln t}{\sigma}\right)}$	$\frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

З наведених співвідношень випливає, що всі характеристики, крім середнього наробітку до першої відмови, залежать від часу (є функціями часу). На рисунку 1.2 показані залежності кількісних характеристик надійності об'єктів від часу.

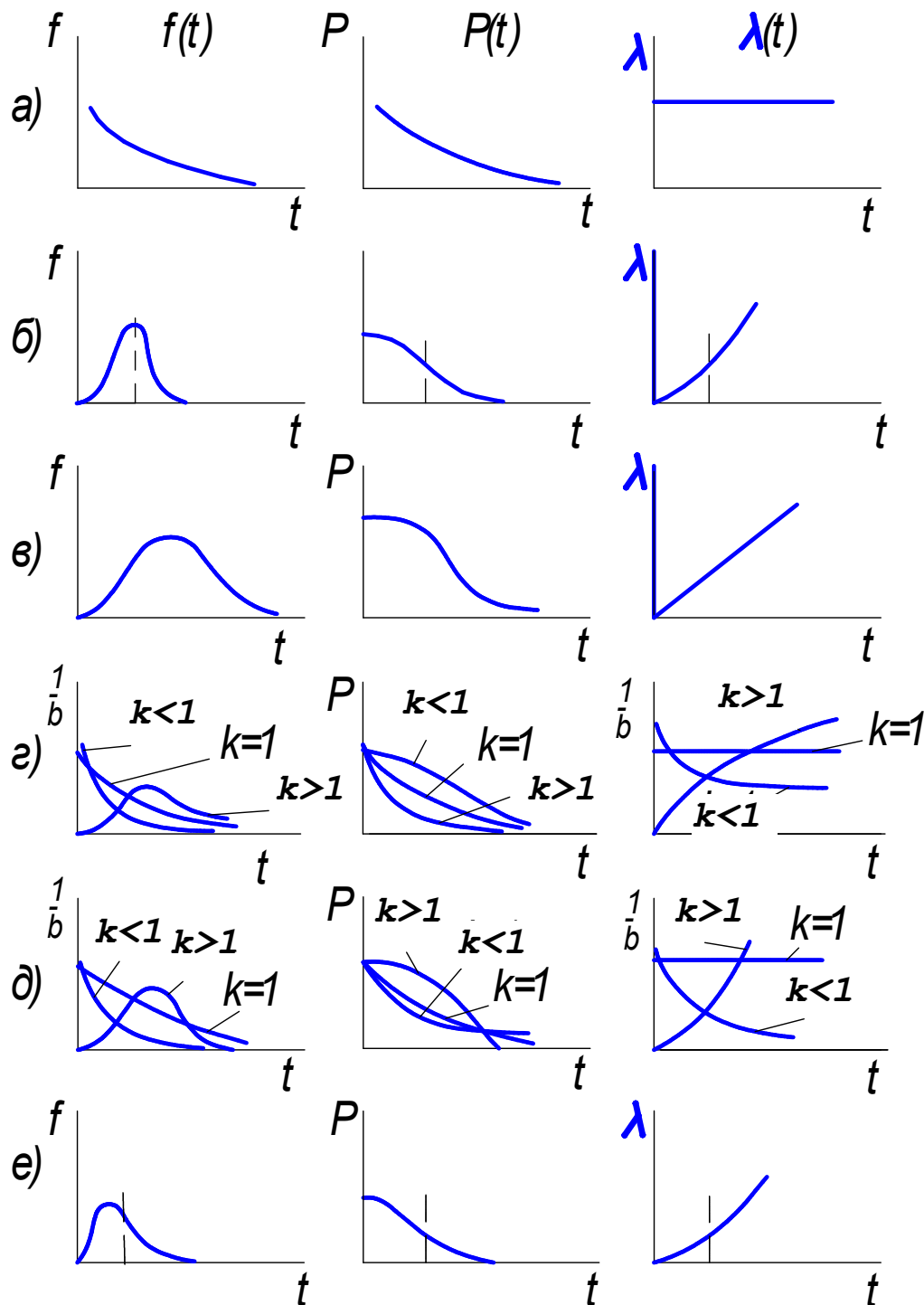


Рисунок 1.2 – Залежності кількісних характеристик надійності від часу:
 а – експонентний закон; б – усічений нормальний закон; в – закон Релею;
 г – гамма-розподіл; д – закон Вейбулла – Гнеденко;
 е – логарифмічно-нормальний закон

Розглянуті критерії надійності дозволяють досить повно оцінювати надійність невідновлюваних об'єктів, а також надійність відновлюваних об'єктів до першої відмови. Наявність декількох критеріїв не означає, що завжди потрібно оцінювати надійність об'єктів по всіх характеристиках.

Найбільш повною характеристикою надійності є частота відмов $f(t)$ (щільність розподілу), вона містить у собі всі дані про випадкове явище – а саме про час безвідмовної роботи.

Середній наробіток до першої відмови є досить наочною характеристикою надійності. Однак застосування цього критерію для оцінки надійності складної системи обмежене в тих випадках, коли:

- час роботи системи набагато менше середнього часу безвідмовної роботи;
- закон розподілу часу безвідмовної роботи не одно-параметричний і для досягнення повної оцінки потрібні моменти вищих порядків;
- система резервована;
- інтенсивність відмов не постійна;
- час роботи окремих частин складної системи різне.

Інтенсивність відмови – найбільш зручна характеристика надійності найпростіших елементів, тому що дозволяє просто обчислювати кількісні характеристики надійності складних систем.

Найбільше доцільно оцінювати надійність складних систем за критерієм *імовірності безвідмовної роботи*, тому що:

- вона входить у якості співмножника в інші, більш загальні характеристики систем, наприклад в ефективність і вартість (ціна й вартість різняться);
- характеризує надійність із урахуванням зміни в часі;
- може бути отримана порівняно простими розрахунками в процесі проектування систем і оцінена в процесі випробувань.

1.4 Критерії надійності відновлюваних виробів

Нехай на випробуванні перебуває N виробів; й нехай вироби, що відмовили, негайно замінюються справними (новими або відремонтованими). Випробування вважаються закінченими, якщо число відмов досягає величини, достатньої для оцінки надійності з певною довірчою ймовірністю. Якщо не враховувати часу, що потребується на відновлення системи, то кількісними характеристиками надійності можуть бути параметр потоку відмов $\mu(t)$ і наробіток на відмову T .

Параметром потоку відмов називається відношення числа виробів, що відмовили, в одиницю часу до випробовуваних виробів за умови, що всі вироби, які вийшли з ладу, замінюються справними (новими або відремонтованими).

Згідно з визначенням,

$$\mu(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\hat{M}\{r(t+\Delta t) - r(t)\}}{\Delta t} \quad (1.17)$$

де Δt – малий відрізок наробітку; $r(t)$ – число відмов, що настали від початкового моменту часу до досягнення наробітку t . Різниця $r(t+\Delta t) - r(t)$ являє собою число відмов на відрізок Δt .

Статистичну оцінку параметра потоку відмов дають по формулі

$$\hat{\mu}(t) = \frac{\hat{r}(t_2) - \hat{r}(t_1)}{t_2 - t_1}. \quad (1.18)$$

Для стаціонарних потоків можна застосовувати формулу

$$\hat{\mu} = \frac{1}{\hat{T}}, \quad (1.19)$$

де \hat{T} – оцінка середнього наробітку на відмову;

$\hat{T} = T = \frac{t}{M\{r(t)\}}$, тут t – сумарний наробіток, $r(t)$ – число відмов, що настали протягом цього наробітку, $M\{r(t)\}$ – математичне очікування цього числа.

Параметр потоку відмов визначається також по формулі

$$\hat{\mu}(t) = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(t + \Delta t) - \sum_{i=1}^N n_i(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^N n_i(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}, \quad (1.20)$$

де $n_i(t)$ – число зразків, що відмовили, в інтервалі часу $(t - \Delta t)/2$ від $(t + \Delta t)/2$ до ; N – число випробовуваних зразків Δt ; – інтервал часу.

Формула (1.18) є статистичним визначенням параметра потоку відмов.

Параметр потоку відмов і частота відмов для ординарних потоків з обмеженою післядією зв'язані інтегральним рівнянням Вольтерри другого роду

$$\mu(t) = f(t) + \int_0^t \mu(\tau) f(t - \tau) d\tau. \quad (1.21)$$

За відомою $f(t)$ можна знайти всі кількісні характеристики надійності невідновлюваних виробів. Тому (1.21) є основним рівнянням, що зв'язує кількісні характеристики надійності невідновлюваних і відновлюваних виробів при миттєвому відновленні.

Рівняння (1.21) можна записати в операторній формі:

$$\mu(s) = \frac{f(s)}{1 - f(s)}, \quad f(s) = \frac{\mu(s)}{1 + \mu(s)}. \quad (1.22)$$

Співвідношення (1.22) дозволяють знайти одну характеристику через іншу, якщо існують перетворення Лапласа функцій $a(s)$ і $m(s)$ і зворотні перетворення формули (1.22).

Параметр потоку відмов має наступні важливі властивості:

1) для будь-якого моменту часу незалежно від закону розподілу часу безвідмовної роботи параметр потоку відмов більше, ніж частота відмов, тобто $\mu(t) \gg f(t)$;

2) незалежно від виду функції $f(t)$ параметр потоку відмов $\mu(t)$ при $t \rightarrow \infty$ прагне до $1/T_{cp}$. Це важлива властивість параметра потоку відмов означає, що при тривалій експлуатації ремонтovanого виробу потік його відмов незалежно від закону розподілу часу безвідмовної роботи стає стаціонарним. Однак це не означає, що інтенсивність відмов є величина постійна;

3) якщо $\lambda(t)$ – зростаюча функція часу, то

$$\lambda(t) > \mu(t) > f(t),$$

4) якщо $\lambda(t)$ – убутна функція, то

$$f(t) > \lambda(t) > \mu(t);$$

5) при $\lambda(t) = \text{const}$ параметр потоку відмов системи не дорівнює сумі параметрів потоків відмов елементів, тобто

$$\mu_c \neq \sum_{i=1}^N \mu_i(t). \quad (1.23)$$

Згідно із цією властивістю параметра потоку відмов можна стверджувати, що при обчисленні кількісних характеристик надійності складної системи не можна підсумувати наявні в цей час значення інтенсивностей відмов елементів, отримані за статистичним даними про відмови виробів в умовах експлуатації, тому що зазначені величини є фактично параметрами потоку відмов;

6) при $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ параметр потоку відмов дорівнює інтенсивності відмов $\mu(t) = \lambda(t) = \lambda$.

Порівняння властивостей інтенсивності й параметра потоку відмов свідчить, що ці характеристики різні.

У цей час широко використовуються статистичні дані про відмови, отримані в умовах експлуатації апаратури. При цьому вони часто обробляються таким чином, що характеристики надійності, що приводяться, є не інтенсивністю відмов, а параметром потоку відмов $\mu(t)$. Це приводить до помилок при розрахунках надійності. У ряді випадків вони можуть бути значними.

Для одержання інтенсивності відмов елементів зі статистичних даних про відмови ремонтovаних систем необхідно скористатися формулою (1.6), для чого слід знати передісторію кожного елемента принципової схеми. Це може суттєво ускладнити методику збору статистичних даних про відмови. Тому до-

цільно визначати $\lambda(t)$ по параметру потоку відмов $\mu(t)$. Методика розрахунків зводиться до наступних обчислювальних операцій:

- за статистичним даними про відмови елементів ремонттованих виробів і по формулі (1.13) обчислюють параметр потоку відмов і будують гістограму $\mu_i(t)$;
- гістограму заміняють кривою, яка апроксимується рівнянням;
- знаходять перетворення Лапласа $\mu_i(s)$ функції $\mu_i(t)$;
- за відомою $\mu_i(s)$ на підставі (1.15) записують перетворення Лапласа $f_i(s)$ частоти відмов;
- за відомою $f_i(s)$ знаходять зворотне перетворення частоти відмов $f_i(t)$;
- знаходять аналітичне вираження для інтенсивності відмов по формулі

$$\lambda_e(t) = f(t) / (1 - \int_0^t f_i(t) dt); \quad (1.24)$$

- будують графік $\lambda_i(t)$.

Якщо є ділянка, де $\lambda_i(t) = \lambda = \text{const}$, то постійне значення інтенсивності відмов ухвалюється для оцінки ймовірності безвідмовної роботи. При цьому вважається справедливим експонентний закон надійності.

Наведена методика не може бути застосована, якщо не вдається знайти за $f(s)$ зворотне перетворення частоти відмов $f(t)$. У цьому випадку доводиться застосовувати наближені методи розв'язку інтегрального рівняння (1.21) або машинні методи розрахунків.

Середнім наробітком на відмову називається відношення сумарного наробітку відновлюваного об'єкта до математичного очікування числа його відмов протягом цього наробітку.

$$T = \frac{t}{M\{n(t)\}}, \quad (1.25)$$

де t – сумарний наробіток; $n(t)$ – число відмов, що настали протягом цього наробітку; $M\{n(t)\}$ – математичне очікування цього числа.

Статистично середній наробіток на відмову обчислюється по формулі

$$\hat{T} = \frac{t}{n_\phi(t)}, \quad (1.26)$$

де $n_\phi(t)$ – число фактичних відмов протягом наробітку t .

Наробіток на відмову є досить наочною характеристикою надійності, тому вона одержала широке поширення на практиці.

Параметр потоку відмов і наробіток на відмову характеризують надійність ремонттованого виробу й не враховують часу, що потребується на його відновлення. Отже, вони не характеризують готовності виробу до виконання

своїх функцій у потрібний час. Для цієї мети вводяться такі критерії, як коефіцієнт готовності й коефіцієнт вимушеного простою.

Коефіцієнтом готовності називається ймовірність того, що об'єкт виявиться в працездатному стані в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких застосування об'єкта по призначенню не передбачається.

Згідно з даним визначенням,

$$K_{\Gamma} = \frac{t_p}{t_p + t_n}, \quad (1.27)$$

де t_p – сумарний час працездатного стану об'єкта; t_n – сумарний час, протягом якого об'єкт не використовувався по призначенню. Значення часу t_p і t_n обчислюють по формулах:

$$t_p = \sum_{i=1}^n t_{pi}, \quad t_n = \sum_{i=1}^n t_{ni}, \quad (1.28)$$

де t_{pi} – час роботи виробу між $(i - 1)$ -ю і i -ю відмовою; t_{ni} – час вимушеного простою після i -ї відмови; n – число відмов (ремонтів) виробу.

Вираження (1.27) є статистичним визначенням коефіцієнта готовності. Для того, щоб здійснити перехід до імовірнісного трактування, величини t_p і t_n замінюються математичними очікуваннями часу між сусідніми відмовами й часу відновлення відповідно. Тоді

$$K_{\Gamma} = \frac{T}{T + T_{\epsilon}}, \quad (1.29)$$

де T – наробіток на відмову; T_{ϵ} – середній час відновлення.

Коефіцієнтом вимушеного простою називається відношення часу вимушеного простою до суми часу справної роботи й часу вимушених простоїв виробу, узятих за той самий календарний строк. Згідно з визначенням,

$$T_{\Pi} = T_{\Pi}^1 / (t_p + t_{\Pi}) \quad (1.30)$$

або, переходячи до середніх величин,

$$K_{\Pi} = t_B / (t_{cp} + t_B). \quad (1.31)$$

Коефіцієнт готовності й коефіцієнт вимушеного простою зв'язані між собою залежністю

$$K_{\Pi} = 1 - K_{\Gamma}. \quad (1.32)$$

При аналізі надійності відновлюваних систем звичайно коефіцієнт готовності обчислюють за формулою

$$K_{\Gamma} = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_B}. \quad (1.33)$$

Формула (1.31) вірна тільки в тому випадку, якщо потік відмов найпростіший, і тоді $t_{cp} = T$.

Часто коефіцієнт готовності ототожнюють із ймовірністю того, що в будь-який момент часу відновлювана система справна. Насправді зазначені характеристики нерівноцінні й можуть бути ототожнені при певних допущеннях.

Дійсно, ймовірність виникнення відмови ремонтної системи на початку експлуатації мала. З ростом часу t ця ймовірність зростає. Це означає, що ймовірність застати систему в справному стані на початку експлуатації буде вище, чим після закінчення деякого часу. Тим часом коефіцієнт готовності не залежить від часу роботи.

Для з'ясування фізичного змісту коефіцієнта готовності K_G необхідно скористатися формулою для ймовірності застати систему в справному стані. При цьому розглядається найбільш простий випадок, коли інтенсивність відмов і інтенсивність відновлення є величини постійні.

Припускаючи, що при $t = 0$ система перебуває в справному стані, себто ($P(0) = 1$), ймовірність застати систему в справному стані можна визначити з формул:

$$P_G(t) = \frac{\mu_B}{\lambda + \mu_B} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu_B} e^{-(\lambda + \mu)t},$$

$$P_G(t) = K_G + (1 - K_G)e^{-t/t_B}, \quad (1.34)$$

де t – середній наробіток на відмову;

t_B – час відновлення;

$$\lambda = \frac{1}{T}, \mu_B = \frac{1}{t_B}, \quad K_G = \frac{T}{T + t_B}. \quad (1.35)$$

Останнє вираження встановлює залежність між коефіцієнтом готовності системи й ймовірністю застати її в справному стані в будь-який момент часу t .

З (1.34) випливає, що $P_G(t) \rightarrow K_G$ при $t \rightarrow \infty$, тобто практично коефіцієнт готовності має сенс ймовірності застати об'єкт у справному стані при, що встановився процесі експлуатації.

У деяких випадках критеріями надійності відновлюваних систем можуть бути також показники безвідмовності невідновлюваних систем, наприклад: ймовірність безвідмовної роботи, частота відмов, середній наробіток до відмови, інтенсивність відмов. Така необхідність виникає завжди, коли є сенс оцінити надійність відновлюваної системи до першої відмови, а також у випадку, коли застосовується резервування з відновленням резервних обладнань, що відмовили в процесі роботи системи, причому відмова всієї резервованої системи не допускається.

1.5 Приклади розв'язку завдань

Пропонується кілька простих прикладів рішення завдань. Слід пам'ятати, що частота, інтенсивність відмов і параметр потоку відмов, обчислені за формулами (1.35), (1.6) і (1.13), є постійними в діапазоні інтервалу часу Δt , а функції $\hat{f}(t)$, $\hat{\lambda}(t)$, $\hat{\mu}(t)$ – східчастими кривими або гістограмами. Для зручності викладу надалі при розв'язку завдань на визначення частоти, інтенсивності й параметра потоку відмов за статистичним даними про відмови виробів відповіді ставляться до середини інтервалу Δt . При цьому результати обчислень графічно представляються не у вигляді гістограм, а у вигляді точок, віднесених до середини інтервалів Δt_i і з'єднаних пивною кривою.

Приклад 1

Припустимо, що на випробування поставлено 1000 однотипних електронних ламп. За 3000 годин відмовило 80 ламп, потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$ і ймовірність відмови $Q(t)$ протягом 3000 годин

Вихідні дані: $N = 1000$ шт. $\Delta t = 3000$ год. $n = 80$ шт.	Рішення: $P(t) = \frac{N - n(t)}{N};$ $P(t) = \frac{1000 - 80}{1000} = 0,92;$ $Q(3000) = 1 - P(3000) = 0,08$ $Q(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08.$	
Знайти: $P(t)$ $Q(t)$		або

Приклад 2

Припустимо, що на випробування поставлено 1000 однотипних електронних ламп. За перші 3000 годин відмовило 80 ламп, а за інтервал часу 3000–4000 годин відмовило ще 50 ламп. Потрібно визначити частоту $f(\Delta t)$ і інтенсивність $\lambda(\Delta t)$ відмов електронних ламп у проміжку часу $\Delta t = 3000$ –4000 годин.

Вихідні дані: $N = 1000$ шт. $\Delta t_1 = 3000$ год. $n_1 = 80$ шт. $\Delta t_2 = [3000, 4000]$ $n_2 = 50$ шт.	Рішення: $f(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N \cdot \Delta t_2}$; $f(\Delta t_2) = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$; $\lambda(\Delta t_2) = \frac{n(\Delta t_2)}{N_{CP} \cdot \Delta t_2}$; де $N_{CP} = \frac{N_{PAB\ 1} + N_{PAB\ 2}}{2}$; $N_{PAB\ 1} = 1000 - 80 = 920$ шт.; $N_{PAB\ 2} = 1000 - 130 = 870$ шт.; $N_{CP} = \frac{(1000 - 80) + (920 - 50)}{2} = 895$ шт.; $\lambda(\Delta t_2) = \frac{50}{895 \cdot 1000} = 5,58 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$.
Знайти: $a(\Delta t_2)$ $\lambda(\Delta t_2)$	

Приклад 3

На випробування поставлене $N_0 = 400$ виробів. За час $t = 3000$ год відмовило $n(t) = 200$ виробів, за інтервал $\Delta t = 100$ год відмовило $n(\Delta t) = 100$ виробів. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи за 3000 год, ймовірність безвідмовної роботи за 3100 год, ймовірність безвідмовної роботи за 3050 год, частоту відмов $f(3050)$, інтенсивність відмов $\lambda(3050)$.

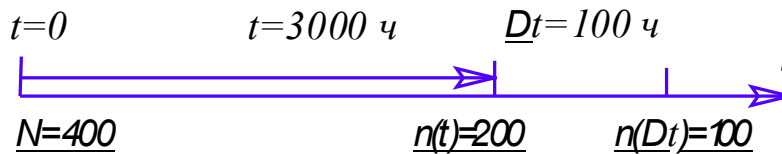


Рисунок 1.3 – Часовий графік

Вихідні дані:	Рішення:
$N = 400$ шт.	Ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою
$t = 3000$ год	$P(t) = \frac{N - n(\Delta t)}{N}$
$n = 200$ шт.	Для $t = 3000$ год (початок інтервалу)
$\Delta t = 100$ год	$P(3000) = \frac{N_0 - n(3000)}{N_0} = \frac{400 - 200}{400} = 0,5$
$n(\Delta t) = 100$ шт.	Для $t = 3100$ год (кінець інтервалу)
Знайти:	$P(3100) = \frac{N_0 - n(3100)}{N_0} = \frac{400 - 300}{400} = 0,25$
$P(3000)$	Середній час справний працюючих виробів в інтервалі Δt :
$P(3100)$	$N_{cp} = \frac{N_t + N_{t+1}}{2} = \frac{200 + 100}{2} = 150$
$P(3050)$	Число виробів, що відмовили за час $t = 3050$ год:
$f(3050) f(3000)$	$n(3050) = N_0 - N_{cp} = 400 - 150 = 250$, тоді
$f(3100)$	$P(3050) = \frac{400 - 250}{400} = 0,375$
$\lambda(3000)$	
$\lambda(3050)$	
$\lambda(3100)$	

Визначається частота відмови:

$$f(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N \cdot \Delta t}; \quad f(3050) = \frac{100}{400 \cdot 100} = 0,0025 = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Так само визначається частота відмов за інтервали 3000 і 3100 год, причому початком інтервалів є $t = 0$.

$$f(3000) = \frac{200}{400 \cdot 3000} = 0,000167 = 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$f(3100) = \frac{300}{400 \cdot 3100} = 0,00024 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Визначається інтенсивність відмов:

а) в інтервалі $\Delta t = 3050$ год, $\lambda(3050) = \frac{n(\Delta t)}{N_{cp} \cdot \Delta t}$;

$$\lambda(3050) = \frac{100}{150 \cdot 100} = 0,0067 = 6,7 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

б) в інтервалі $\Delta t = 3000$ год, $N_{cp}(3000) = 400 - 100 = 300$ шт.;

$$\lambda(3000) = \frac{100}{300 \cdot 3000} = 0,000222 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

в) в інтервалі $\Delta t = 3100$ год, $N_{cp}(3100) = 400 - 150 = 250$ шт.;

$$\lambda(3100) = \frac{100}{250 \cdot 3000} = 0,00039 = 3,9 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}.$$

Приклад 4

Протягом деякого періоду часу проводилося спостереження за роботою одного об'єкта. За весь період зареєстроване $n = 15$ відмов. До початку спостережень об'єкт проробив 258 год, до кінця спостереження наробіток склав 1233 год. Визначити середній наробіток на відмову t_{cp} .

Вихідні дані:	Рішення:
$n = 15$	Наробіток за зазначений період склав
$t_1 = 258$ год	$\Delta t = t_1 - t_2 = 1233 - 258 = 975$ ч.
$t_2 = 1233$ год	Наробіток на відмову за статистичним даними визначають
Знайти:	за формулою
t_{cp}	$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n},$

де t_i – час справної роботи між $(i - 1)$ і i відмовами; n – число відмов за якийсь час t .

Прийнявши $\sum_{i=1}^n t_i = 975$ год, можна визначити середній наробіток на відмову

$$t_{cp} = \frac{975}{15} = 65 \text{ год}.$$

Приклад 5

Проводилося спостереження за роботою трьох однотипних об'єктів. За період спостереження було зафіксовано по першому об'єкту 6 відмов, по другому – 11 відмов, третьому – 8 відмов. Наробіток першого об'єкта $t_1 = 6181$ год, другого $t_2 = 329$ год, третього $t_3 = 245$ ч. Визначити наробіток об'єктів на відмову.

Вихідні дані:	Рішення:
$N = 3$ шт.	1-й варіант розв'язку:
$n_1 = 6$ шт.	$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n_i};$
$n_2 = 11$ шт.	$T_1 + T_2 + T_3 n_1 + n_2 + n_3 t_{cp} = \frac{T_1 + T_2 + T_3}{n_1 + n_2 + n_3};$
$n_3 = 8$ шт.	
$t_1 = 181$ год	
$t_2 = 329$ год	
$t_3 = 245$ год	
Знайти:	$t_{cp} = \frac{181 + 329 + 245}{6 + 11 + 8} = 30,2 \text{ год};$
t_{cp}	

2-й варіант розв'язку:

$$t_{cp1} = \frac{t_1}{n_1}, \quad t_{cp2} = \frac{t_2}{n_2}, \quad t_{cp3} = \frac{t_3}{n_3};$$

$$t_{cp1} = \frac{181}{6} = 30,21816 \text{ год}; \quad t_{cp2} = \frac{329}{11} = 29,9 \text{ год}; \quad t_{cp3} = \frac{245}{8} = 30,625 \text{ год};$$

$$t_{cp} = (30,2 + 29,9 + 30,6) / 3 = 30,2 \text{ ч.}$$

Як можливо бачити, у завдання є два варіанти розв'язку. Перший заснований на використанні загальної формули обчислення середнього наробітку; другий – більш детальний: спочатку знаходять середній наробіток для кожного елемента, а середнє значення цих чисел і є те, що визначається.

Приклад 6

Система складається з 5 приладів, причому відмова будь-якого одного з них призводить до відмови системи. Відомо, що перший відмовив 34 рази протягом 952 год роботи, другий – 24 рази протягом 960 год роботи, а інші прилади протягом 210 год роботи відмовили 4, 6 і 5 раз відповідно. Потрібно визначити наробіток на відмову системи в цілому, якщо є дійсним експонентний закон надійності для кожного з п'яти приладів.

Вихідні дані:

$N = 5$ шт.

$n_1 = 34$ шт.

$n_2 = 24$ шт.

$n_3 = 4$ шт.

$n_4 = 6$ шт.

$n_5 = 5$ шт.

$t_1 = 952$ год

$t_2 = 960$ год

$t_{3-5} = 210$ год

Знайти:

t_{cp}

Рішення:

Використовують наступні співвідношення:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i; \quad t_{cp} = \frac{1}{\lambda_c}.$$

Визначають інтенсивність відмов для кожного приладу ($N = 1$):

$$\lambda_i = \frac{n_i}{N_{cp} \cdot \Delta t},$$

де N_{cp} – середнє число справне працюючих виробів в інтервалі Δt .

$$\lambda_1 = \frac{34}{952} = 0,0357 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_2 = \frac{24}{960} = 0,025 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_3 = \frac{4}{210} = 0,02 \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda_4 = \frac{6}{210} = 0,03 \text{ год}^{-1}; \quad \lambda_5 = \frac{5}{210} = 0,02 \text{ год}^{-1};$$

або

$$\sum_{i=1}^N \lambda_{3...5} = \frac{4+6+5}{210} = 0,0714 \text{ год}^{-1};$$

тоді інтенсивність відмов системи буде

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N \lambda_i = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_{3...5} = 0,0357 + 0,025 + 0,0714 = 0,132 \text{ год}^{-1}.$$

Середній наробіток на відмову системи дорівнює

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,132} = 7,41 \text{ год}.$$

Приклад 7

За спостережуваний період експлуатації в апаратурі було зафіксовано 8 відмов. Час відновлення склав: $t_1 = 12$ хв, $t_2 = 23$ хв, $t_3 = 15$ хв, $t_4 = 9$ хв, $t_5 = 17$ хв, $t_6 = 28$ хв, $t_7 = 25$ хв, $t_8 = 31$ хв.

Потрібно визначити середній час відновлення апаратури.

Вихідні дані:	Рішення:
$n = 8$ відмов	
$t_1 = 12$ хв	
$t_2 = 23$ хв	
$t_3 = 15$ хв	
$t_4 = 9$ хв	
$t_5 = 17$ хв	
$t_6 = 28$ хв	
$t_7 = 25$ хв	
$t_8 = 31$ хв	
Знайти:	
$t_{cp.в}$	$t_{cp.в} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} = \frac{12 + 23 + 15 + 9 + 17 + 28 + 25 + 31}{8} = 20^{12+23+15+9+17+28+25+318} \text{ хвИЛИН.}$

Приклад 8

Апаратура мала середній наробіток на відмову $t_{cp} = 65$ год і середній час відновлення $t_в = 1,25$ ч. Потрібно визначити коефіцієнт готовності $K_г$.

Вихідні дані:	Рішення:
$t_{cp} = 65$ год	
$t_в = 1,25$ год	
Знайти:	
$K_г$	$K_г = \frac{t_{cp}}{t_{cp} + t_в} = \frac{65}{65 + 1,25} = 0,98^{6565+1,25}.$

Приклад 9

Нехай час роботи елемента до відмови підлягає експонентному закону $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи $P(t)$, частоту відмов $f(t)$ і середній наробіток на відмову t_{cp} , якщо $t = 500, 1000, 2000$ год.

Вихідні дані:	Рішення:
$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-5}$ год ⁻¹	
$t_1 = 500$ год	
$t_2 = 1000$ год	
$t_3 = 2000$ год	
Знайти:	
$P(t)$	
$f(t)$	
t_{cp}	
	$P(t) = e^{-\lambda t};$ $P(t_1) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 500} = 0,98;$ $P(t_2) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 1000} = 0,97;$ $P(t_3) = e^{-2,5 \cdot 0,00001 \cdot 2000} = 0,95;$ $f(t) = \lambda \cdot P(t);$ $f(t_1) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,98 = 2,45 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$ $f(t_2) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,97 = 2,425 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$ $f(t_3) = 2,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,95 = 2,375 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1};$ $t_{cp} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-5}} = 4 \cdot 10^4 = 12,5 \cdot 10^5 \text{ год.}$

Приклад 10

Час роботи виробу до відмови підкоряється закону розподілу Релею. Потрібно визначити кількісні характеристики: $P(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, t_{cp} при $t_1 = 500$ год, $t_2 = 1000$ год, $t_3 = 2000$ год, якщо параметр розподілу $\sigma = 1000$ ч.

Вихідні дані:

$t_1 = 500$ год

$t_2 = 1000$ год

$t_3 = 2000$ год

$\sigma = 1000$ год

Знайти:

$P(t)$

$f(t)$

$\lambda(t)$

t_{cp}

Рішення:

Необхідно скористатися формулами, відповідними до закону розподілу Релею ([8], таблиця 1.1)

$$f(t) = \frac{t}{\sigma^2} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad \text{хссе-хх/2}\sigma\sigma;$$

$$f(500) = \frac{500}{1000^2} e^{-\frac{500^2}{2 \cdot 1000^2}} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$f(1000) = \frac{1000}{1000^2} e^{-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 6,1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$f(2000) = \frac{2000}{1000^2} e^{-\frac{2000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$P(t) = \int f(t) dt = e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad \text{ftdte-хх/2}\sigma\sigma;$$

$$P(500) = e^{-\frac{500^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,88 e^{-500 \cdot 500 / 2 \cdot 1000 \cdot 1000};$$

$$P(1000) = e^{-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,61 e^{-1000 \cdot 1000 / 2 \cdot 1000 \cdot 1000};$$

$$P(2000) = e^{-\frac{2000^2}{2 \cdot 1000^2}} = 0,14 e^{-2000 \cdot 2000 / 2 \cdot 1000 \cdot 1000};$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)};$$

$$\lambda(500) = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{0,88} = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda(1000) = \frac{6,1 \cdot 10^{-4}}{0,61} = 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$\lambda(2000) = \frac{2,7 \cdot 10^{-4}}{0,14} = 1,93 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1};$$

$$t_{cp} = \frac{1}{\lambda};$$

$$t_{cp}(500) = \frac{1}{4,5 \cdot 10^{-4}} = 2,2 \cdot 10^3 \text{ год};$$

$$t_{cp}(1000) = \frac{1}{10^{-3}} = 10^3 \text{ год};$$

$$t_{cp}(2000) = \frac{1}{1,93 \cdot 10^{-3}} = 0,5 \cdot 10^3 = 500 \text{ год}.$$

Приклад 11

Час безвідмовної роботи гіроскопічного обладнання із шарикопідшипниками в осях ротора гіроскопа підкоряється закону Вейбулла – Гнеденко з параметрами $k = 1,5$, $\lambda_o = 10^{-4} \text{ год}^{-1}$, а час його роботи $t = 100 \text{ ч}$. Потрібно обчислити кількісні характеристики надійності такого обладнання.

Вихідні дані: $k = 1,5$ $\lambda_o = 10^{-4} \text{ год}^{-1}$ $t = 100 \text{ год}$	Рішення: Використовують формули закону Вейбулла-Гнеденко для визначення кількісних характеристик. Визначають ймовірність безвідмовної роботи:
Знайти: $P(t)$ $f(t)$ $\lambda(t)$ t_{cp}	$P(t) = e^{-\lambda_o t^k};$ $P(100) = e^{-10^{-4} \cdot 100^{1,5}} = 0,9.$ Частота відмов визначається за формулою $f(t) = \lambda_o k t^{k-1} \cdot e^{-\lambda_o t^k}.$

Тоді

$$f(100) = 10^{-4} \cdot 1,5 \cdot 100^{0,5} \cdot 0,9 = 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$$

Інтенсивність відмов визначається за формулою

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P(t)};$$

$$\lambda(100) = \frac{f(100)}{P(100)} = \frac{1,35 \cdot 10^{-3}}{0,9} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}.$$

Обчислюють середній наробіток до першої відмови

$$t_{cp} = \Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right) / \lambda_o^{1/k}.$$

Спочатку обчислюють значення гамма-функції, скориставшись довідковими даними ([8], табл. П.7.18):

$$x = (1/k) + 1 = (1/1,5) + 1 = 1,67.$$

Значення гамма-функції

x	$\Gamma(x)$
1,67	0,90330

Отримані значення підставляють у формулу [8, с. 38]:

$$t_{cp} = 0,90330 / (10^{-4})^{1/1,5} \approx 418 \text{ год}.$$

Приклад 12

Відомо, що інтенсивність відмов $\lambda = 0,02 \text{ год}^{-1}$, а середній час відновлення $t_B = 10 \text{ год}$. Потрібно обчислити коефіцієнт готовності й функцію готовності виробу.

Вихідні дані: $t_B = 10 \text{ год}$ $\lambda = 0,02 \text{ год}^{-1}$	Рішення: Коефіцієнт готовності виробу визначається по формулі
Знайти: K_G P_G	$K_G = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + t_B}.$ <p>Середній наробіток до першої відмови дорівнює $t_{cp} = 1/\lambda$.</p> <p>Тоді</p> $K_G = \frac{1/\lambda}{1/\lambda + t_B}, \quad K_G = \frac{1/0,02}{1/0,02 + 10} = 0,83.$

Функція готовності виробу визначається за формулою

$$P_G(t) = K_G + (1 - K_G)e^{-t/K_G t_B}, \quad P_G(t) = 0,83 + (1 - 0,83)e^{-t/0,83 \cdot 10} = 0,83 + 0,17e^{-0,12t}$$

де t – будь-який момент часу, при $t = 0$ система перебуває в справному стані.

Приклад 13

Система складається з 12 600 елементів, середня інтенсивність відмов яких $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

Необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом $t = 50 \text{ год}$.

Вихідні дані: $N = 12\,600$ $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$ $t = 50 \text{ год}$	Рішення: Інтенсивність відмов системи визначають за формулою $\lambda_c = \lambda_{cp} N = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12\,600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$.
Знайти: $P(t)$	Ймовірність безвідмовної роботи з експонентного закону дорівнює: $P(50) = e^{-\lambda_c t} = e^{-4,032 \cdot 10^{-3} \cdot 50} \approx 0,82.$

Приклад 14

Система складається з $N = 5$ блоків. Надійність блоків характеризується ймовірністю безвідмовної роботи протягом часу t , яка дорівнює: $p_1(t) = 0,98$; $p_2(t) = 0,99$; $p_3(t) = 0,97$; $p_4(t) = 0,985$; $p_5(t) = 0,975$.

Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи.

Вихідні дані: $N = 5$ $p_1(t) = 0,98$ $p_2(t) = 0,99$ $p_3(t) = 0,97$ $p_4(t) = 0,985$ $p_5(t) = 0,975$	Рішення: Необхідно скористатися формулою для визначення безвідмовної роботи системи: $P_c(t) = \prod_{i=1}^N p_i(t) = 0,98 \cdot 0,99 \cdot 0,97 \cdot 0,985 \cdot 0,975 = 0,904.$
Знайти: $P_c(t)$	Ймовірності $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$, $p_5(t)$ близькі до одиниці, тому обчислити $P_c(t)$ зручно, користуючись наближеною формулою. У цьому випадку $q_1 = 0,02$; $q_2 = 0,01$; $q_3 = 0,03$; $q_4 = 0,015$; $q_5 = 0,025$. Тоді $P_c(t) = \prod_{i=1}^5 p_i(t) \approx 1 - \sum_{i=1}^5 q_i(t) = 1 - (0,02 + 0,01 + 0,03 + 0,015 + 0,025) = 0,9.$

Приклад 15

Система складається із трьох обладнань. Інтенсивність відмов електронного обладнання дорівнює $\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1} = \text{const}$.

Інтенсивності відмов двох електромеханічних обладнань лінійно залежать від часу й визначаються наступними формулами: $\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ год}^{-1}$, $\lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ год}^{-1}$.

Потрібно розрахувати ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом 100 год.

Вихідні дані:

$N = 3$

$\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3} \text{ год}^{-1}$

$\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ год}^{-1}$

$\lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \text{ год}^{-1}$

$t = 100 \text{ год}$

Знайти:

$P(t)$

Рішення:

Тому що $\lambda \neq \text{const}$, те на підставі формули

$$P_c(t) = \exp\left(-\sum_{i=1}^N \int_0^t \lambda_i(t) dt\right)$$

можна написати

$$P_c(t) = \exp\left\{-\left[\int_0^t \lambda_1(t) dt + \int_0^t \lambda_2(t) dt + \int_0^t \lambda_3(t) dt\right]\right\} =$$

$$= \exp\left[-\left(\lambda_1 t + 0,23 \cdot 10^{-4} \frac{t^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \frac{t^{3,6}}{3,6}\right)\right],$$

при $t = 100 \text{ год}$

$$P_c(100) = \exp\left[-\left(0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 100 + 0,23 \cdot 10^{-4} \frac{100^2}{2} + 0,06 \cdot 10^{-6} \frac{100^{3,6}}{3,6}\right)\right] \approx 0,33.$$

Приклад 16

Система складається із трьох блоків, середній наробіток до першої відмови яких рівна $T_1 = 160 \text{ год}$, $T_2 = 320 \text{ год}$, $T_3 = 600 \text{ год}$. Для блоків діє експонентний закон надійності.

Потрібно визначити середній наробіток до першої відмови системи.

Вихідні дані:

$N = 3$

$T_1 = 160 \text{ год}$

$T_2 = 320 \text{ год}$

$T_3 = 600 \text{ год}$

Знайти:

$t_{ср.с}$

Рішення:

Згідно з експонентним законом $P(t) = \exp(-\lambda t)$.

Інтенсивність відмов системи:

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3}.$$

Середній наробіток до першої відмови системи:

$$t_{ср.с} = \frac{1}{\lambda_c},$$

отже,

$$t_{ср.с} = \frac{1}{\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} + \frac{1}{T_3}} = \frac{1}{\frac{1}{160} + \frac{1}{320} + \frac{1}{600}} \approx 91 \text{ год}.$$

Приклад 17

Система складається із двох пристроїв. Імовірності безвідмовної роботи кожного з них протягом часу $t = 100$ год рівні: $p_1(100) = 0,95$; $p_2(100) = 0,97$. Діє експонентний закон надійності. Необхідно знайти середній наробіток до першої відмови системи $t_{cp.c}$.

Вихідні дані:	Рішення:
$N = 2$	Визначають ймовірність безвідмовної роботи виробу:
$t = 100$ год	$P_c(100) = p_1(100) \cdot p_2(100) = 0,95 \cdot 0,97 = 0,92$.
$p_1(100) = 0,95$	Визначають інтенсивність відмов виробу за формулою
$p_2(100) = 0,97$	$P_c(100) = e^{-\lambda_c t} = e^{-\lambda_c 100}$;
Знайти:	$\lambda_c = -\frac{\ln 0,92}{100} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$,
$t_{cp.c}$	$t_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{8,3 \cdot 10^{-4}} \approx 1205 \text{ год}$.

Приклад 18

Імовірність безвідмовної роботи одного елемента протягом часу t дорівнює $p(t) = 0,9997$. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи системи, що полягає з $N = 100$ таких же елементів.

Вихідні дані:	Рішення:
$p(t) = 0,9997$	1-й варіант розв'язку:
$N = 100$	Якщо у всіх елементів системи однакова надійність, то
Знайти:	$P_c(t) = p^N(t) = (0,9997)^{100} = 0,9704$.
P_c	2-й варіант розв'язку:
	Тому що ймовірність $P_c(t)$ близька до одиниці, можна скористатися наступною формулою:
	$P_c(t) = 1 - Q_c(t)$.
	Для одного елемента системи:
	$q(t) = 1 - p(t) = 1 - 0,9997 = 0,0003$; себто
	$Q_c(t) = N \cdot q(t) = 100 \cdot 0,0003 = 0,03$.
	3 $P_c(t) + Q_c(t) = 1$ впливає $P_c(t) = 1 - 0,03 = 0,97$.
	Виходить, що перший варіант розв'язку більш точніший.

Приклад 19

Імовірність безвідмовної роботи системи протягом часу t рівна $P_c(t) = 0,95$. Система складається з $N = 120$ рівнонадійних елементів. Потрібно визначити ймовірність безвідмовної роботи елемента $p_i(t)$.

Вихідні дані:	Рішення:
$P_c(t) = 0,95$	Очевидно, що ймовірність безвідмовної роботи елемента буде
$N = 120$	$P_i(t) = \sqrt[N]{P_c(t)}$ НРс. Тому що $P_c(t)$ близька до одиниці, то обчислення зручно виконувати за формулою
Знайти:	$Q_c = 1 - P_c(t) = 1 - 0,95 = 0,05$.
$P_i(t)$	

Тоді

$$P_i(t) = \sqrt[N]{P_c(t)} = 1 - \frac{Q_c(t)}{N} = 1 - \frac{0,05}{120} = 0,9996$$

Приклад 20

У системі $N_c = 2500$ елементів, імовірність безвідмовної роботи її протягом однієї години $P_c(1) = 98 \%$. Передбачається, що всі елементи рівнонадійні й інтенсивність відмов елементів $\lambda = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$. Потрібно визначити середній наробіток до першої відмови системи $t_{cp.c}$.

Вихідні дані:
 $N_c = 2500$
 $P_c(1) = 98 \%$
 $\lambda = 8,4 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$
 Знайти:
 $t_{cp.c}$

Рішення:
 Інтенсивність відмов системи визначимо за формулою
 $\lambda_c = N \cdot \lambda = 8,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2500 = 0,021 \text{ год}^{-1}$,
 середній наробіток до першої відмови системи дорівнює:
 $t_{cp.c} = 1/\lambda_c = 1/0,021 = 47,6 \text{ год}$.

Приклад 21

Система складається з п'яти приладів, імовірності справної роботи яких протягом часу $t = 100$ год дорівнюють: $p_1(100) = 0,9996$; $p_2(100) = 0,9998$; $p_3(100) = 0,9996$; $p_4(100) = 0,999$; $p_5(100) = 0,9998$. Потрібно визначити частоту відмов системи в момент часу $t = 100$ ч.

Передбачається, що відмови приладів незалежні й для них діє експонентний закон надійності.

Вихідні дані:
 $t = 100 \text{ год}$
 $p_1(100) = 0,9996$
 $p_2(100) = 0,9998$
 $p_3(100) = 0,9996$
 $p_4(100) = 0,999$
 $p_5(100) = 0,9998$

Знайти:
 f_c

Рішення:
 За умовами завдання відмови приладів незалежні, тому ймовірність безвідмовної роботи системи дорівнює добутку ймовірностей безвідмовної роботи приладів. Тоді для випадку високонадійних систем (при значеннях p_i , близьких до одиниці) маємо:

$$P_c(t) = p_1(t) p_2(t) p_3(t) \dots p_N(t) = 1 - \sum q_i(t),$$

$$P_c(100) \approx 1 - \sum_{i=1}^5 Q_i(100) = 1 - (0,0004 + 0,00002 + 0,0004 + 0,001 + 0,0002) = 0,9978.$$

Тому що ймовірність безвідмовної роботи системи близька до одиниці, то відповідно до формули

$$P_c(t) \approx 1 - t \sum_{i=1}^r N_i \lambda_i = 1 - \lambda_c t$$

інтенсивність відмов можна обчислити в такий спосіб:

$$\lambda_c = \frac{1 - P_c(t)}{t} = \frac{1 - 0,9978}{100} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1},$$

тоді частоту відмов визначимо відповідно до формули:

$$ac(t) \approx \lambda_c (1 - \lambda_c t) = 2,2 \cdot 10^{-5} (1 - 2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 100) = 2,195 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

Приклад 22

Виріб складається з 12 малопотужних низькочастотних германієвих транзисторів, 4 площинних кремнієвих випрямлячів, 50 керамічних конденсаторів, 168 резисторів типу МЛТ, 1 силового трансформатора, 2 розжарювальних трансформаторів, 5 дроселів і 4 котушок індуктивності. Необхідно знайти ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом $t = 200$ год і середній наробіток до першої відмови.

Вихідні дані:	Рішення:
$N_1 = 12$	Для розв'язку даного завдання обчислюються величини інтенсивності відмов виробу, потім складається й заповнюється таблиця 1.2. Значення інтенсивності відмов елементів вибираються з [8] (таблиці П.3.1, П.3.5, П.3.7).
$N_2 = 4$	
$N_3 = 50$	
$N_4 = 168$	
$N_5 = 1$	
$N_6 = 2$	
$N_7 = 5$	
$N_8 = 4$	
$t = 200$ год	
Знайти:	
$P_c(200)$	
$t_{cp.c}$	

Таблиця 1.2 – Інтенсивність відмов елементів

Найменування й тип елемента	Кількість елементів N_i	Інтенсивність відмов, год ⁻¹	
		$\lambda_i \cdot 10^{-5}$	$N_i \lambda_i \cdot 10^{-5}$
Транзистор малопотужний низькочастотний германієвий	12	0,3	3,6
Випрямляч площинний кремнієвий	4	0,5	2
Конденсатор керамічний	50	0,14	7
Резистор типу МЛТ	168	0,05	8,4
Трансформатор силовий	1	0,3	0,3
Трансформатор розжарювальний	2	0,2	0,4
Дросель	5	0,1	0,5
Котушка індуктивності	4	0,05	0,2

$$\sum_{i=1}^8 N_i = 246; \quad \lambda_c = \sum_{i=1}^8 N_i \lambda_i = 22,4 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}.$$

За даними таблиці 1.2 і по формулі для експонентного закону знаходять ймовірність безвідмовної роботи виробу протягом $t = 200$ год і середній наробіток до першої відмови:

$$P_c(200) = e^{-\lambda_c t} = e^{-22,4 \cdot 10^{-5} \cdot 200} \approx 0,956,$$

$$t_{cp.c} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{22,4 \cdot 10^{-5}} = 4464 \text{ год}.$$

2 ПРИКЛАДИ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ Й РИЗИКУ СИСТЕМ

2.1 Розрахунки надійності системи аспірації

При оцінці надійності технічних систем найбільше доцільно розрахувати саму небезпечну з них. Наприклад, у комплексі харчової промисловості найбільшу небезпеку являє собою місцева вентиляція із системою аспірації, що видаляє запилене повітря з робочої зони борошнопросіювальної і тістомісильної машин. Це пояснюється тим, що за певних умов присутність борошняного пилу в повітрі може привести до вибуху. Надійність системи аспірації розраховується на підставі наведених далі початкових умов.

Аналіз безвідмовності системи. При аналізі складної технічної системи застосовується метод *«дерево несправностей»* – організована графічна уява умов або інших факторів, що викликають небажану подію, називана *«вершиною подій»*. При побудові «дерева» використовується певна символіка. Стани елементів, або, (у більш загальному змісті), вихідні події (які не можуть бути підрозділені) представляються окружностями, а наслідки – прямокутниками. Подія найбільшої важливості (верхова подія) представляється у вигляді прямокутника, розташованого на вершині «дерева». Таким може бути подія, що полягає в повній несправності системи або її відмові. Аналогічні події для підсистем також будуть позначатися прямокутниками.

Визначається ймовірність відмови вентиляційної системи для відділень просівання борошна й готування тесту.

Опис системи

Аспіраційна система (рисунок 2.1), що видаляє запилене повітря з робочої зони борошнопросіювальної і тістомісильної машин, складається з пилозахисного вентилятора, системи повітряпроводів із двома парасолями й обладнань очищення від борошняного пилу.

Робота борошнопросіювальної і тістомісильної машин прямо залежить від справності вентиляційної системи. З'єднання всіх машин, що порошать, і вентиляції через блок запуску з таймером затримки забезпечує найбільший ступінь захисту від можливого вибуху.

При включенні встаткування першої запускається система аспірації, і тільки через 3 хвилини, якщо блок керування прийняв сигнали від датчиків системи про справний її стан, включається встаткування. Такий контроль виключає збільшення концентрації борошняного пилу й тим самим зменшує ризик вибуху пилоповітряної суміші.

Перелік відмов системи вентиляції:

- 1) зниження тиску у повітряпроводі після кишенькового фільтра (засмічення фільтра);
- 2) зменшення концентрації пилу при проходженні повітря через циклон незначне (засмічення циклону);

- 3) відмова запобіжника;
- 4) вихід з ладу підшипника електродвигуна;
- 5) вихід з ладу крильчатки охолодження електродвигуна;
- 6) між-гілкове замикання обмотки електродвигуна;
- 7) обрив обмотки електродвигуна;
- 8) відмова кінцевого вимикача;
- 9) вихід з ладу пульта керування;
- 10) вихід з ладу сигналізатора засмічення кишенькового фільтра;
- 11) вихід з ладу сигналізатора засмічення циклону;
- 12) вихід з ладу дросельної заслінки парасоля;
- 13) зношування чепцевого ущільнювача;
- 14) зношування з'єднання вала й блоків ремінної передачі;
- 15) зношування ремінної передачі;
- 16) вихід з ладу підшипника вала робочого колеса;
- 17) зношування постійної муфти.

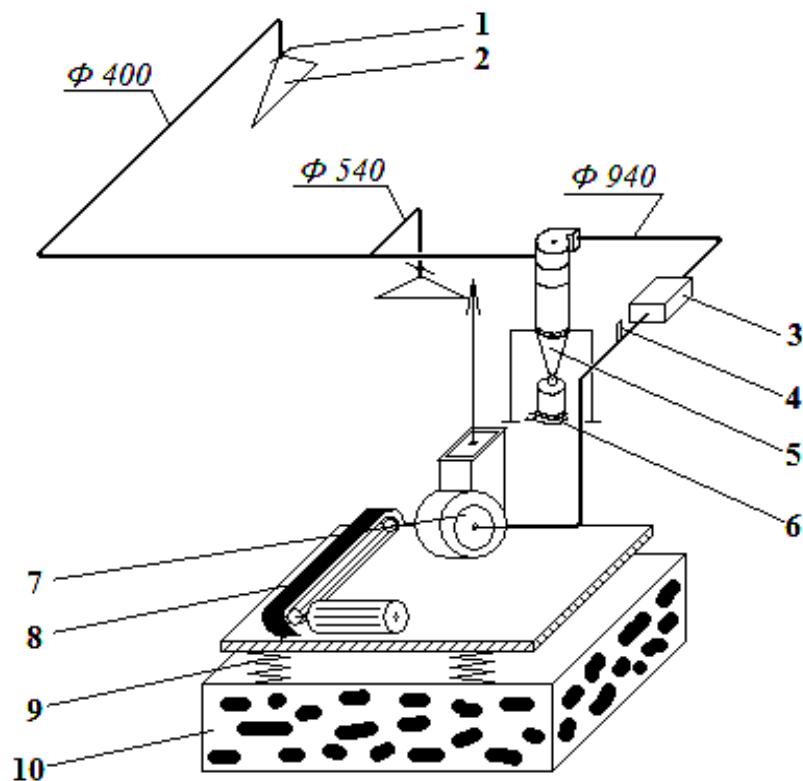


Рисунок 2.1 – Схема вентиляційної системи:

- 1 – дросельна заслінка; 2 – витяжний парасоль; 3 – фільтр кишеньковий;
 4 – датчик засмічення фільтра й роботи вентилятора;
 5 – циклон; 6 – датчик засмічення циклону; 7 – вентилятор;
 8 – пасова передача; 9 – віброопора; 10 – підстава

Наробіток на відмову вентиляційної системи визначається за формулою

$$T = 1/\lambda_{cl},$$

де λ_{cl} – інтенсивність відмови самого слабкого елемента системи.

$$T=16\,000 \text{ ч.}$$

Розраховуються значення ймовірностей безвідмовної роботи для ланок по формулі $P(t) = e^{-\lambda T}$. Значення інтенсивностей відмов елементів системи обрані з [2], [10]. Результати розрахунків наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Інтенсивність відмов і ймовірність безвідмовної роботи елементів вентиляційної системи

№ з/п	Найменування відмови	Інтенсивність відмови λ , год ⁻¹	Імовірність безвідмовної роботи $P(t)$
1	Зниження тиску у повітряпроводі	$\lambda(1) = 8 \cdot 10^{-6}$	$P(1) = e^{-\lambda T} = 0,88$
2	Зменшення концентрації пилу	$\lambda(2) = 8 \cdot 10^{-6}$	$P(2) = e^{-\lambda T} = 0,88$
3	Відмова запобіжника	$\lambda(3) = 5 \cdot 10^{-6}$	$P(3) = e^{-\lambda T} = 0,92$
4	Вихід з ладу підшипника електродвигуна	$\lambda(4) = 2,22 \cdot 10^{-6}$	$P(4) = e^{-\lambda T} = 0,97$
5	Вихід з ладу крильчатки охолодження електродвигуна	$\lambda(5) = 1,1 \cdot 10^{-7}$	$P(5) = e^{-\lambda T} = 0,99$
6	Міжвігількове замикання обмотки електродвигуна	$\lambda(6) = 3 \cdot 10^{-6}$	$P(6) = e^{-\lambda T} = 0,99$
7	Обрив обмотки електродвигуна	$\lambda(7) = 3 \cdot 10^{-8}$	$P(7) = e^{-\lambda T} = 0,99$
8	Відмова кінцевого вимикача	$\lambda(8) = 3 \cdot 10^{-6}$	$P(8) = e^{-\lambda T} = 0,95$
9	Вихід з ладу пульта керування	$\lambda(9) = 3 \cdot 10^{-7}$	$P(9) = e^{-\lambda T} = 0,99$
10	Вихід з ладу сигналізатора засмічення кишенькового фільтра	$\lambda(10) = 5,3 \cdot 10^{-6}$	$P(10) = e^{-\lambda T} = 0,92$
11	Вихід з ладу сигналізатора засмічення циклону	$\lambda(11) = 3 \cdot 10^{-6}$	$P(11) = e^{-\lambda T} = 0,95$
12	Вихід з ладу дросельної заслінки парасоля	$\lambda(12) = 3,4 \cdot 10^{-6}$	$P(12) = e^{-\lambda T} = 0,95$
13	Зношування чепцевого ущільнювача	$\lambda(13) = 3 \cdot 10^{-6}$	$P(13) = e^{-\lambda T} = 0,94$
14	Зношування з'єднання вала й блоків ремінної передачі	$\lambda(14) = 0,25 \cdot 10^{-6}$	$P(14) = e^{-\lambda T} = 0,99$
15	Зношування ремінної передачі	$\lambda(15) = 3,6 \cdot 10^{-6}$	$P(15) = e^{-\lambda T} = 0,94$
16	Вихід з ладу підшипника вала робочого колеса	$\lambda(16) = 2 \cdot 10^{-6}$	$P(16) = e^{-\lambda T} = 0,95$
17	Зношування постійної муфти	$\lambda(17) = 2,5 \cdot 10^{-6}$	$P(17) = e^{-\lambda T} = 0,96$

«Дерево несправностей» вентиляційної системи показане на рисунку 2.2.

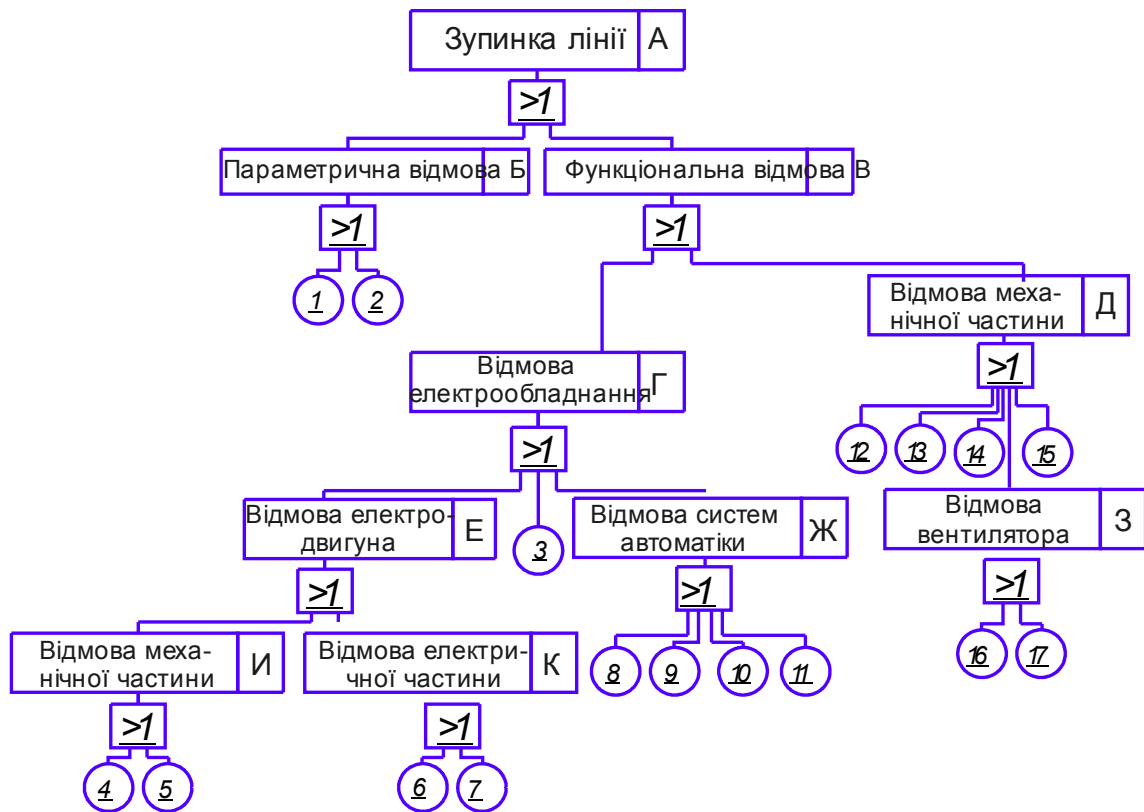


Рисунок 2.2 – «Дерево несправностей» вентиляційної системи

Необхідно визначити ймовірність відмови системи.

Рішення:

1. Визначається ймовірність появи події B (параметрична відмова) для паралельного з'єднання елементів:

$$3 P(t) + Q(t) = 1 \text{ впливає, що } Q(t) = 1 - P(t), \text{ тоді}$$

$$Q(B) = Q(1) + Q(2) - Q(1) \cdot Q(2) = 1 - P(1) \cdot P(2);$$

$$Q(B) = 0,226 = 2,26 \cdot 10^{-1}.$$

2. Визначається ймовірність появи події I (відмова механічної частини електродвигуна):

$$Q(I) = Q(4) + Q(5) - Q(4) \cdot Q(5) = 1 - P(4) \cdot P(5);$$

$$Q(I) = 0,04 = 4 \cdot 10^{-2}.$$

3. Визначається ймовірність появи події K (відмова електричної частини електродвигуна):

$$Q(K) = Q(6) + Q(7) - Q(6) \cdot Q(7) = 1 - P(6) \cdot P(7);$$

$$Q(K) = 0,002 = 2 \cdot 10^{-3}.$$

4. Визначається ймовірність появи події E (вихід з ладу електродвигуна):

$$Q(E) = Q(I) + Q(K) - Q(I) \cdot Q(K);$$

$$Q(E) = 0,06 = 6 \cdot 10^{-2}.$$

5. Визначається ймовірність появи події Z (вихід з ладу систем автоматики):

$$Q(Z) = 1 - P(8) \cdot P(9) \cdot P(10) \cdot P(11);$$

$$Q(Z) = 0,17 = 1,7 \cdot 10^{-1}.$$

6. Визначається ймовірність появи проміжної верхової події Γ (вихід з ладу електроустаткування). Подія може відбутися тільки тоді, коли відбудеться хоча б одно із трьох подій E , \mathcal{K} и \mathcal{Z} , причому подія \mathcal{Z} є елементарною:

$$Q(\Gamma) = 1 - P(E) \cdot P(\mathcal{Z}) \cdot P(\mathcal{K});$$

$$Q(\Gamma) = 0,28 = 2,8 \cdot 10^{-1}.$$

7. Визначається ймовірність появи події \mathcal{Z} (вихід з ладу вентилятора):

$$Q(\mathcal{Z}) = 1 - P(16) \cdot P(17);$$

$$Q(\mathcal{Z}) = 0,097 = 9,7 \cdot 10^{-2}.$$

8. Визначається ймовірність появи проміжної верхової події \mathcal{D} (вихід з ладу механічної частини). Подія може відбутися тільки тоді, коли відбудеться хоча б одна з п'яти подій 12, 13, 14, 15 і 3, причому події 12, 13, 14, 15 є елементарними.

$$Q(\mathcal{D}) = 1 - P(12) \cdot P(13) \cdot P(14) \cdot P(15) \cdot P(3);$$

$$Q(\mathcal{D}) = 0,24 = 2,4 \cdot 10^{-1}.$$

9. Визначається ймовірність появи проміжної верхової події B (функціональна відмова). Подія може відбутися тільки тоді, коли відбудеться хоча б одне із двох подій \mathcal{D} або Γ .

$$Q(B) = 1 - P(\mathcal{D}) \cdot P(\Gamma);$$

$$Q(B) = 0,29 = 2,9 \cdot 10^{-1}.$$

10. Визначається ймовірність появи верхової події A (відмова вентиляційної системи). Подія може відбутися тільки тоді, коли відбудеться хоча б одна із двох подій B або \mathcal{B} .

$$Q(A) = Q(B) + Q(\mathcal{B}) - Q(B) \cdot Q(\mathcal{B}) = 1 - P(B) \cdot P(\mathcal{B});$$

$$Q(A) = 0,45 = 4,5 \cdot 10^{-1}.$$

Таким чином, ймовірність відмови системи рівна 0,45.

Ймовірність безвідмовної роботи розраховується за формулою

$$P(t) + Q(t) = 1;$$

$$P(t) = 0,55.$$

Ймовірність безвідмовної роботи вентиляційної системи в період нормальної експлуатації рівна 0,55.

2.2 Аналіз небезпек і ризиків зварювального цеху

2.2.1 Завдання й мети проведення аналізу ризику

Аналіз ризику аварій на небезпечних виробничих об'єктах є частиною керування промисловою безпекою.

Об'єкт аналізу – зварювальний цех.

Мета і завдання аналізу ризику об'єкта:

- виявлення небезпек і апіорна кількісна оцінка ризику з урахуванням впливу вражаючих факторів аварії на персонал, населення, майно й навколишнє природне середовище;

- забезпечення інформацією для розробки інструкцій, технологічного регламенту й планів ліквідації (локалізації) аварійних ситуацій.

Таким чином, основне завдання аналізу ризику полягає в тому, щоб надати об'єктивну інформацію про стан промислового об'єкта особам, що ухвалюють розв'язку відносно безпеки аналізованого об'єкта.

Кількісна оцінка ризику відноситься до завдання, розв'язуваного з використанням методів теорії імовірності, вона базується на статистику аварійних ситуацій, які стали раніше на аналогічних об'єктах. Основною базою для оцінки ризику, у зв'язку з обмеженим поширенням інформації з аварійності на об'єктах у попередній період, є якісна оцінка небезпек, заснована на інженерному досвіді проектних інститутів і експлуатаційних служб, що використовують запроектовані об'єкти в сфері промислового виробництва.

Основні процедури аналізу ризику:

- планування й організація робіт;
- ідентифікація небезпек;
- оцінка ризику;
- розробка рекомендацій зі зменшення ризику.

У якості джерел ризику розглядаються зварювальний апарат-випрямляч постійного струму «ДУГА 318 М1» (рисунок 2.3 і таблиця 2.2) і напівавтомат зварювальний «КРИСТАЛ ПДГО-570-4К» (рисунок 2.4 і таблиця 2.4).

Опис об'єктів

1. Зварювальний апарат-випрямляч постійного струму «ДУГА 318 М1» призначений для ручного дугового зварювання прямого й складного профілю різних металів і сплавів на постійному струмі будь-якої полярності всіма видами електродів, а також у середовищі захисних газів. Його можна використовувати у виробничих цехах і польових умовах, у пересувних майстернях, комунальному господарстві й т.п. «ДУГА 318 М1» має різні виконання по підключенню до мережі 220 і 380 В. Габаритні розміри апарата $400 \times 300 \times 360$ мм.

Кліматичне виконання апарата – У, категорія розміщення – 3, тип атмосфери II за ГОСТ 15150, але для робіт при нижньому значенні температури навколишнього середовища від 258 К (–15 °С) до 313 К (+40 °С).

Не допускається використання апаратів у вибухонебезпечному середовищі, а також утримуючої їдкі пари й газу, що руйнують метали й ізоляцію.

Допускається короткочасна (не більш 6 год) експлуатація апарата при температурі навколишнього середовища 318 К (+45 °С) і відносній вологості 98 %.

Ступінь твердості кліматичних факторів зовнішнього середовища III за ГОСТ 16962.1.

Ступінь захисту по IP 22 відповідно до ГОСТ 14254.

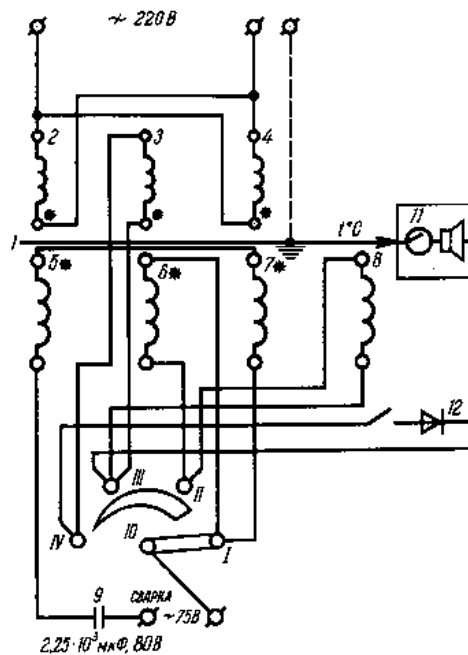


Рисунок 2.3 – Зварювальний апарат-випрямляч постійного струму «ДУГА 318 М1»

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики зварювального апарата «ДУГА 318 М1»

Характеристика	Значення
Напруга живлення, В	220
Максимальний зварювальний струм, А	170
Межі регулювання зварювального струму, А	30–160
Максимальна споживана з мережі повна потужність, кВа	4,5
Коефіцієнт потужності (Cos ф) при струмах від 80 до 200 А, не гірше	0,95
Тривалість навантаження, ПН %, не гірше	60
ККД, %, не гірше	0,8
Маса, кг	25
Габаритні розміри, мм	400×200× 360

2. Напівавтомат зварювальний «КРИСТАЛ ПДГО-570-4К».

До складу зварювального напівавтомата входять (рисунок 2.4): пальник 1 (комплект) зі шлангом 2; механізм 3 подачі електродного дроту; касета 5; котушка або інші обладнання, що є ємностями для електродного дроту; шафа 4 або блок керування, якщо він конструктивно не об'єднаний із джерелом живлення; джерело живлення 7; провідники 9 для зварювального ланцюга й 8 ланцюгів керування; редуктор 10 і апаратура для регулювання й виміру витрати газу; шланг 6 для газу в напівавтоматах для зварювання в захисних газах; підігрівник газу в напівавтоматах для зварювання в середовищі вуглекислого газу, обладнання для подачі флюсу в напівавтоматах для зварювання під флюсом.

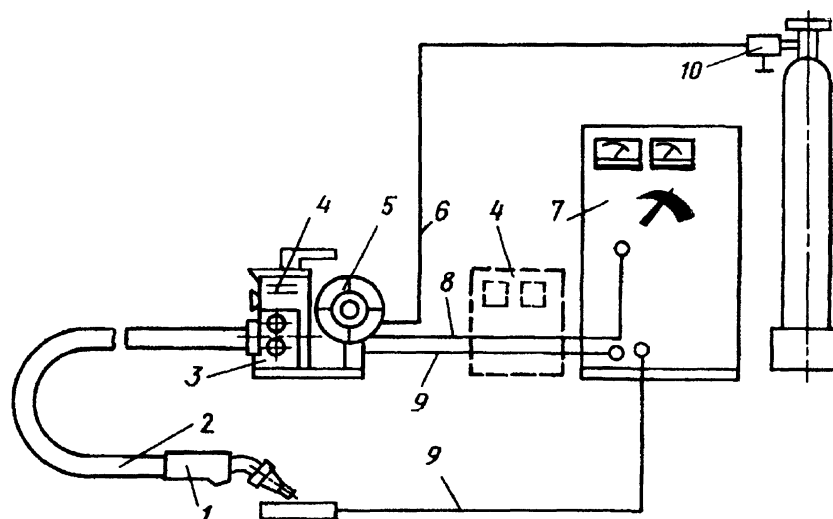


Рисунок 2.4 – Напівавтомат зварювальний «КРИСТАЛ ПДГО-570-4К»

Механізм подачі ПДГО-570-4К с чотирма провідними роликами призначений для дугового зварювання в захисних газах (вуглекислий газ, аргон і т.п.) виробів з маловуглецевих, низьколегованих і легованих сталей, алюмінію і його сплавів протяжним переривчастим швом і електрозаклепками. Зварювання здійснюється постійним струмом зворотної полярності електродним дротом, що плавиться. Допускається використання порошкового дроту. Вбудований блок керування забезпечує високу стабільність швидкості подачі дроту й дозволяє регулювати всі необхідні параметри зварювання. Механізм, що подає, ПДГО-570-4К оснащений вбудованим цифровим уніфікованим блоком керування зварювальними процесами.

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики напівавтомата зварювального «КРИСТАЛ ПДГО-570-4К»

Характеристика	Значення
Напруга мережі, В	220
Зварювальний струм, А	60–500
Режим роботи, ПВ %	60
Діаметр дроту, мм	1,0–2,0
Маса, кг	13
Габарити, мм	660 × 185 × 405

2.2.2 Розрахунки надійності встаткування й ризику

Таблиця 2.4 – Імовірність виникнення аварійної ситуації

№ з/п	Подія	Імовірність $P(t)$
1	Порушення правил безпеки	$5 \cdot 10^{-4}$
2	Виконання ремонту встаткування під час роботи	$4 \cdot 10^{-5}$
3	Розрив зварювальних гумово-тканевих рукавів	$3 \cdot 10^{-5}$
4	Механічне ушкодження редуктора	$5 \cdot 10^{-5}$
5	Вихід з ладу гайки редуктора	$2 \cdot 10^{-6}$
6	Вихід з ладу прокладки	$4 \cdot 10^{-4}$
7	Перевищення тиску газу в балоні	$4 \cdot 10^{-6}$
8	Експлуатація несправного балона	$2 \cdot 10^{-5}$

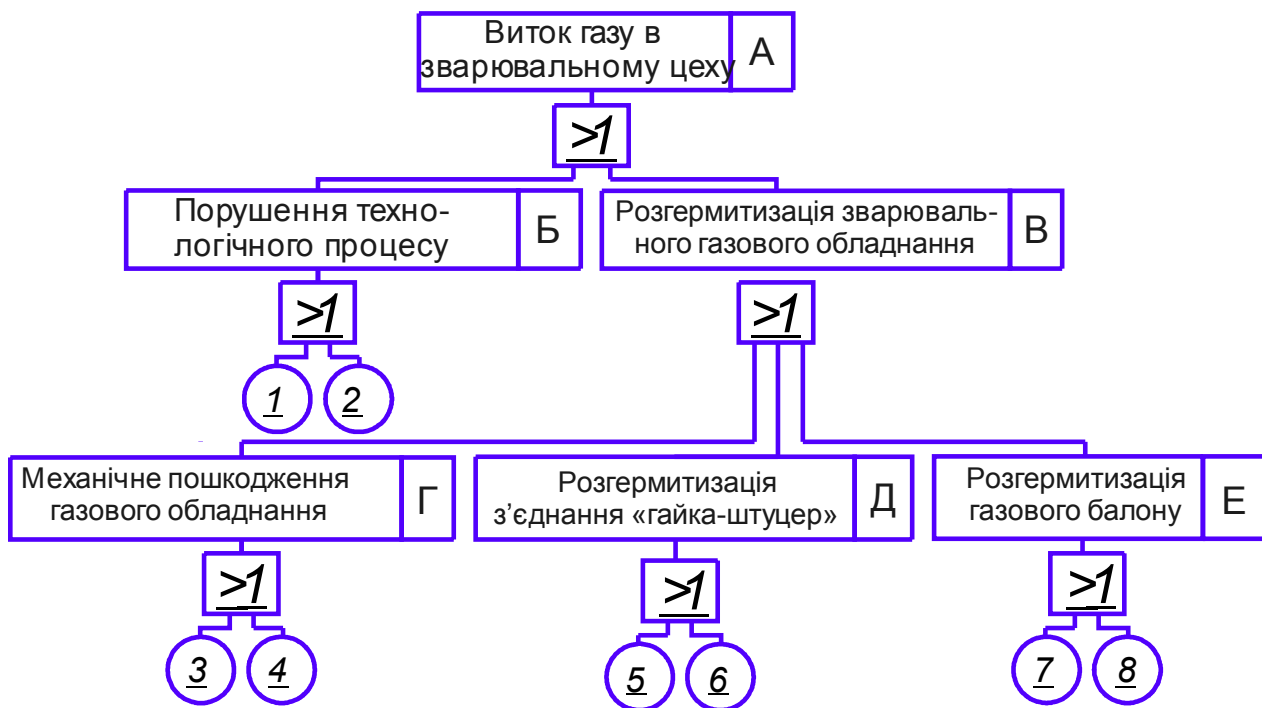


Рисунок 2.5 – Імовірність витоку газу у зварювальному цеху

Розрахунки ймовірності виникнення аварійної ситуації:

1. $P_A = P_B + P_B - P_B \cdot P_B$;
2. $P_B = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2$;
3. $P_B = P_G + P_D + P_E - P_G \cdot P_D - P_D \cdot P_E - P_E \cdot P_G + P_G \cdot P_D \cdot P_E$;
4. $P_G = P_3 + P_4 - P_3 \cdot P_4$;
5. $P_D = P_5 + P_6 - P_5 \cdot P_6$;
6. $P_E = P_7 + P_8 - P_7 \cdot P_8$.

Розрахунки ймовірності заподіяння збитку здоров'ю (за даними таблиці 2.5):

1. $R = 1 - (1 - P_B) \cdot (1 - P_B) \cdot (1 - P_G) \cdot (1 - P_D) \cdot (1 - P_E) \cdot (1 - P_{Ж}) \cdot (1 - P_3)$.
2. $P_B = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2$;
3. $P_B = P_3 + P_4 - P_3 \cdot P_4$;
4. $P_G = P_5 + P_6 - P_5 \cdot P_6$;
5. $P_D = P_7 + P_8 - P_7 \cdot P_8$;
6. $P_E = P_9 + P_{10} - P_9 \cdot P_{10}$;
7. $P_{Ж} = P_{11} + P_{12} - P_{11} \cdot P_{12}$;
8. $P_3 = 1 - (1 - P_{13}) \cdot (1 - P_{14}) \cdot (1 - P_{15})$.

«Дерево ризиків» показане на рисунку 2.6.

Таблиця 2.5 – Імовірність подій, що приводять до заподіяння збитку здоров'ю електрозварювача

з/п	Подія	Імовірність $P(t)$
1	Дотик до струмоведучих частин зварювального встаткування	$5 \cdot 10^{-4}$
2	Робота без електрозахисних засобів	$2 \cdot 10^{-4}$
3	Виконання робіт без захисного щитка	$2 \cdot 10^{-4}$
4	Виконання робіт без спецодягу	$4 \cdot 10^{-4}$
5	Травмування в процесі зварювання при падінні виробу	$3 \cdot 10^{-4}$
6	Травмування в процесі підготовки виробу	$2 \cdot 10^{-4}$
7	Влучення розплавленого металу на легкозаймистий матеріал	$4 \cdot 10^{-5}$
8	Витік газу з балонів	$3 \cdot 10^{-4}$
9	Влучення розпеченого металу на відкриті частини тіла	$2 \cdot 10^{-5}$
10	Дотик до відкритого вогню	$2 \cdot 10^{-5}$
11	Перевищення концентрації шкідливих речовин у повітрі робочої зони	$5 \cdot 10^{-4}$
12	Витік газу з балонів	$3 \cdot 10^{-6}$
13	Виникнення вибухонебезпечної концентрації	$4 \cdot 10^{-5}$
14	Робота поблизу легкозаймистих речовин	$3 \cdot 10^{-4}$
15	Наявність джерела вогню	$5 \cdot 10^{-4}$

Ризик заподіяння збитку здоров'ю газоелектрозварника до виконання заходів щодо поліпшення умов праці:

$$R = 1 - (1 - 2,5 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 3,2 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 3,4 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 4 \cdot 10^{-5}) \times \\ \times (1 - 5 \cdot 10^{-6}) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-12}) = 2,8 \cdot 10^{-4}.$$

Ризик заподіяння збитку здоров'ю газоелектрозварника після виконання заходів щодо поліпшення умов праці:

$$R = 1 - (1 - 2,5 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 3,2 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 3,4 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 4 \cdot 10^{-5}) \times \\ \times (1 - 6 \cdot 10^{-12}) = 1,8 \cdot 10^{-4}.$$

Після виконання заходів ризик заподіяння збитку здоров'ю газоелектрозварника зменшується на $\Delta = 2,8 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-4} = 1 \cdot 10^{-4}$.

За результатами виконаних розрахунків:

1. Імовірність витоку газу в приміщенні зварювального цеху:

$$P_A = 1,1 \cdot 10^{-5}.$$

2. Ризик заподіяння збитку здоров'ю:

$$R = 1,4 \cdot 10^{-4}.$$

Професійна діяльність газоелектрозварника відноситься до другої категорії безпеки як відносно безпечна робота

$$R = 10^{-4} \dots 10^{-3}.$$

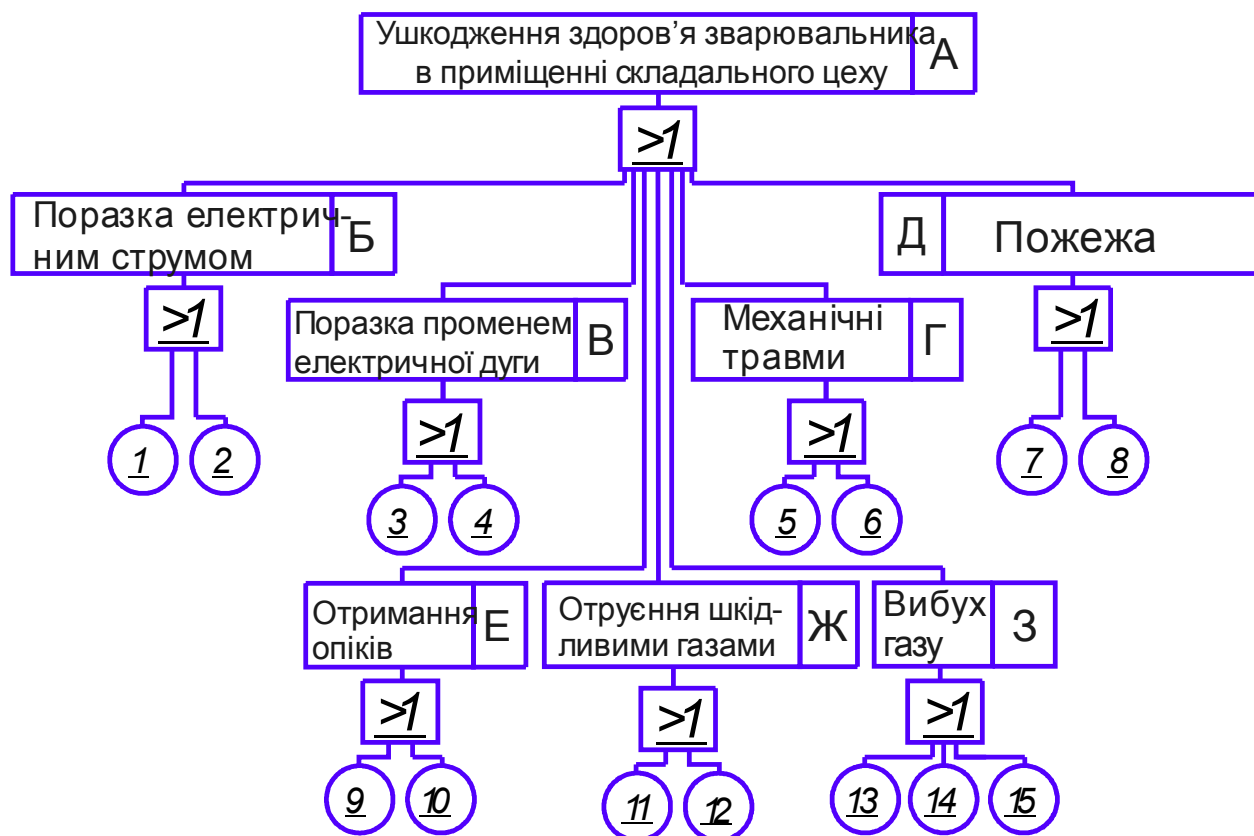


Рисунок 2.6 – «Дерево ризиків» заподіяння збитку здоров'ю

2.3 Аналіз і розрахунки надійності й ризиків фарбувальної лінії

2.3.1 Розрахунки надійності

Недостатня надійність устаткування приводить до величезних витрат на ремонт, до простою встаткування, до припинення постачання населення електроенергією, водою, газом, транспортними засобами, до невиконання відповідальних завдань, іноді до аварій, пов'язаних з більшими економічними втратами, руйнуванням великих об'єктів і з людськими жертвами.

Для визначення причин виникнення відмов на виробничому встаткуванні застосовується аналіз методом «дерева несправностей».

Оцінка можливості відмови або безвідмовної роботи окремих елементів технічних систем проводиться на основі статистичних даних по інтенсивності їх відмови.

Фарбувальна лінія складається з великої кількості технічних елементів, відмова яких може привести до її поломки або передчасного зношування основних вузлів, що може суттєво вплинути на процеси промивання, фарбування й сушіння виробів. До складу лінії входять ланцюговий підвісний конвеєр, пневмообладнання й гідро-устаткування, а також такі електроприлади й обладнання, як інфрачервоні панелі, електродвигуни, кінцеві вимикачі і т.д. Наробіток на відмову лінії становить більш 20 000 год. Значення інтенсивності відмов наведені в таблиці 2.6.

Розглядається період нормальної експлуатації, коли $\lambda = \text{const}$.

Таблиця 2.6 – Інтенсивність відмов елементів фарбувальної лінії

Поз.	Найменування відмови	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-4}$, год ⁻¹
1	Відмова кінцевого вимикача	3
2	Відмова таймера промивної камери	0,75
3	Відмова таймера № 1 сушильної камери	0,75
4	Відмова таймера № 2 сушильної камери	0,75
5	Відмова інфрачервоної камери	0,9
6	Відмова датчика струму вентиляторів камери	0,6
7	Відмова датчика споживання струму інфрачервоних панелей	0,6
8	Відмова запобіжника	0,35
9	Відмова підшипника електродвигуна вентилятора камери попереднього сушіння, фарбувальної камери, сушильної камери, насоса й конвеєра	0,3
10	Поломка крильчатки електродвигуна вентилятора	0,1
11	Міжгілкове замикання обмотки електродвигуна	1,17
12	Обрив обмотки електродвигуна вентилятора	0,9
13	Відмова електропневмоклапану відкриття дверей	1,1
14	Замикання кабелю електропневмоклапану на корпус	0,7
15	Зношування манжети пневмоциліндру воріт камер	4,3
16	Зношування повітряного шланга пневмосистеми	3,66
17	Відмова підшипника електродвигуна насоса	0,3
18	Поломка крильчатки електродвигуна насоса	0,1
19	Міжгілкове замикання обмотки електродвигуна насоса	1,17
20	Обрив обмотки електродвигуна насоса	0,9
21	Відмова підшипника насоса	0,43
22	Зношування сальника насоса	4
23	Відмова зворотного клапана	1,7
24	Втрата герметичності трубопроводу	1,1
25	Відмова підшипника підвісної каретки лінії	0,65
26	Зношування роликового ланцюга лінії	5
27	Поломка пружини натяжної зірочки лінії	0,1125
28	Зношування зубів натяжної зірочки лінії	1,5
29	Відмова підшипника електродвигуна конвеєра	0,3
30	Поломка крильчатки електродвигуна конвеєра	0,1
31	Міжгілкове замикання обмотки електродвигуна конвеєра	1,17
32	Обрив обмотки електродвигуна конвеєра	0,9
33	Відмова редуктора приводу конвеєра	2
34	Зношування зубів приводної зірочки конвеєра	1,5
35	Відмова редуктора приводу конвеєра	2
36	Поломка крильчатки витяжного вентилятора фарбувальної камери	0,15
37	Порушення техпроцесу промивання виробу	1,5
38	Порушення техпроцесу сушіння виробу	1,7
39	Порушення техпроцесу фільтрації повітря	1
40	Порушення руху виробу через камери	2,5

За формулою $P(t) = e^{-\lambda t}$ визначається ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента при $t = 20000$ год (результати розрахунків – у таблиці 2.7).

Таблиця 2.7 – Розрахунки ймовірності безвідмовної роботи елементів у період нормальної експлуатації

$P(1) = e^{-0,00003 \cdot 20000} = 0,548$	$P(21) = e^{-0,0000043 \cdot 20000} = 0,917$
$P(2) = e^{-0,0000075 \cdot 20000} = 0,861$	$P(22) = e^{-0,00004 \cdot 20000} = 0,449$
$P(3) = e^{-0,0000075 \cdot 20000} = 0,861$	$P(23) = e^{-0,000017 \cdot 20000} = 0,711$
$P(4) = e^{-0,0000075 \cdot 20000} = 0,861$	$P(24) = e^{-0,000011 \cdot 20000} = 0,803$
$P(5) = e^{-0,000009 \cdot 20000} = 0,835$	$P(25) = e^{-0,0000065 \cdot 20000} = 0,878$
$P(6) = e^{-0,000006 \cdot 20000} = 0,886$	$P(26) = e^{-0,00005 \cdot 20000} = 0,368$
$P(7) = e^{-0,000006 \cdot 20000} = 0,886$	$P(27) = e^{-0,000001125 \cdot 20000} = 0,978$
$P(8) = e^{-0,0000035 \cdot 20000} = 0,932$	$P(28) = e^{-0,000015 \cdot 20000} = 0,741$
$P(9) = e^{-0,000003 \cdot 20000} = 0,942$	$P(29) = e^{-0,000003 \cdot 20000} = 0,942$
$P(10) = e^{-0,000001 \cdot 20000} = 0,98$	$P(30) = e^{-0,000001 \cdot 20000} = 0,98$
$P(11) = e^{-0,0000117 \cdot 20000} = 0,79$	$P(31) = e^{-0,0000117 \cdot 20000} = 0,79$
$P(12) = e^{-0,000009 \cdot 20000} = 0,835$	$P(32) = e^{-0,000009 \cdot 20000} = 0,835$
$P(13) = e^{-0,000011 \cdot 20000} = 0,818$	$P(33) = e^{-0,00002 \cdot 20000} = 0,67$
$P(14) = e^{-0,000007 \cdot 20000} = 0,869$	$P(34) = e^{-0,000015 \cdot 20000} = 0,741$
$P(15) = e^{-0,000043 \cdot 20000} = 0,423$	$P(35) = e^{-0,00002 \cdot 20000} = 0,67$
$P(16) = e^{-0,0000366 \cdot 20000} = 0,481$	$P(36) = e^{-0,0000015 \cdot 20000} = 0,97$
$P(17) = e^{-0,000003 \cdot 20000} = 0,942$	$P(37) = e^{-0,000015 \cdot 20000} = 0,741$
$P(18) = e^{-0,000001 \cdot 20000} = 0,98$	$P(38) = e^{-0,000017 \cdot 20000} = 0,718$
$P(19) = e^{-0,0000117 \cdot 20000} = 0,802$	$P(39) = e^{-0,00001 \cdot 20000} = 0,819$
$P(20) = e^{-0,000009 \cdot 20000} = 0,835$	$P(40) = e^{-0,000025 \cdot 20000} = 0,607$

Ймовірність відмови елемента визначається за формулою

$$P(t) + Q(t) = 1.$$

1. Визначається ймовірність відмови електричної частини електродвигуна приводу конвеєра (підсистеми $Щ$) і ймовірність безвідмовної роботи:

$$Q(Щ) = 1 - P(31) \cdot P(32);$$

$$Q(Щ) = 0,34; \quad P(Щ) = 0,66.$$

2. Визначається ймовірність відмови механічної частини електродвигуна приводу конвеєра (підсистеми III) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(III) = 1 - P(29) \cdot P(30); \\ Q(III) = 0,076; \quad P(III) = 0,923.$$

3. Визначається ймовірність відмови електродвигуна приводу конвеєра (підсистеми $Ч$) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(Ч) = 1 - P(III) \cdot P(III); \\ Q(Ч) = 0,39; \quad P(Ч) = 0,61.$$

4. Визначається ймовірність відмови електричної частини приводу конвеєра (підсистеми T) і ймовірність її безвідмовної роботи. По «дереву несправностей» (рисунок 2.7) $T = Ч$.

$$Q(T) = Q(Ч) = 0,39; \quad P(T) = P(Ч) = 0,61.$$

5. Визначається ймовірність відмови механічної частини приводу конвеєра (підсистеми B) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(B) = 1 - P(33) \cdot P(34); \\ Q(B) = 0,503; \quad P(B) = 0,496.$$

6. Визначається ймовірність відмови приводу конвеєра (підсистеми H) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(H) = 1 - P(T) \cdot P(B); \\ Q(H) = 0,697; \quad P(H) = 0,303.$$

7. Визначається ймовірність відмови механічної частини фарбувальної лінії (підсистеми $Ж$) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(Ж) = 1 - P(25) \cdot P(26) \cdot P(H) \cdot P(27) \cdot P(28) \cdot P(35) \cdot P(36); \\ Q(Ж) = 0,95; \quad P(Ж) = 0,05.$$

8. Визначається ймовірність відмови механічної частини електродвигунів насосів (підсистеми Φ) і ймовірність її безвідмовної роботи

$$Q(\Phi) = 1 - P(17) \cdot P(18); \\ Q(\Phi) = 0,076; \quad P(\Phi) = 0,923.$$

9. Визначається ймовірність відмови електричної частини електродвигунів насосів (підсистеми X) і ймовірність її безвідмовної роботи

$$Q(X) = 1 - P(19) \cdot P(20); \\ Q(X) = 0,33; \quad P(X) = 0,67.$$

10. Визначається ймовірність відмови електродвигунів насосів (підсистеми P) і ймовірність їх безвідмовної роботи:

$$Q(P) = 1 - P(\Phi) \cdot P(X); \\ Q(P) = 0,382; \quad P(P) = 0,618.$$

11. Визначається ймовірність відмови електричної частини гідроустаткування (підсистеми \mathcal{L}) і ймовірність її безвідмовної роботи. По «дереву несправностей» $P = \mathcal{L}$.

$$Q(\mathcal{L}) = 0,382; \quad P(\mathcal{L}) = 0,618.$$

12. Визначається ймовірність відмови трубопроводу (підсистеми \mathcal{Z}) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{C}) = 1 - P(23) \cdot P(24);$$
$$Q(\mathcal{C}) = 0,43; \quad P(\mathcal{C}) = 0,57.$$

13. Визначається ймовірність відмови механічної частини гідроустаткування (підсистеми \mathcal{M}) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{M}) = 1 - P(21) \cdot P(22) \cdot P(\mathcal{C});$$
$$Q(\mathcal{M}) = 0,77; \quad P(\mathcal{M}) = 0,23.$$

14. Визначається ймовірність відмови гідроустаткування (підсистеми \mathcal{E}) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{E}) = 1 - P(\mathcal{L}) \cdot P(\mathcal{M});$$
$$Q(\mathcal{E}) = 0,86; \quad P(\mathcal{E}) = 0,14.$$

15. Визначається ймовірність відмови електричної частини пневмооборудовання (підсистеми \mathcal{H}) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{H}) = 1 - P(13) \cdot P(14);$$
$$Q(\mathcal{H}) = 0,289; \quad P(\mathcal{H}) = 0,711.$$

16. Визначається ймовірність відмови механічної частини пневмооборудовання (підсистеми \mathcal{K}) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{K}) = 1 - P(15) \cdot P(16);$$
$$Q(\mathcal{K}) = 0,797; \quad P(\mathcal{K}) = 0,203.$$

17. Визначається ймовірність відмови пневмообладнання (підсистеми \mathcal{D}) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{D}) = 1 - P(\mathcal{H}) \cdot P(\mathcal{K});$$
$$Q(\mathcal{D}) = 0,999; \quad P(\mathcal{D}) = 0,001.$$

18. Визначається ймовірність відмови механічної частини електродвигунів вентиляторів (підсистеми \mathcal{O}) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{O}) = 1 - P(9) \cdot P(10);$$
$$Q(\mathcal{O}) = 0,007; \quad P(\mathcal{O}) = 0,993.$$

19. Визначається ймовірність відмови електричної частини електродвигунів вентиляторів (підсистеми \mathcal{I}) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(\mathcal{I}) = 1 - P(11) \cdot P(12);$$
$$Q(\mathcal{I}) = 0,34; \quad P(\mathcal{I}) = 0,66.$$

20. Визначається ймовірність відмови електродвигунів вентиляторів (підсистеми 3) і ймовірність їх безвідмовної роботи:

$$Q(3) = 1 - P(O) \cdot P(\Pi);$$
$$Q(3) = 0,339; \quad P(\Pi) = 0,609.$$

21. Визначається ймовірність відмови електроустаткування фарбувальної лінії (підсистеми Γ) і ймовірність його безвідмовної роботи:

$$Q(\Gamma) = 1 - P(1) \cdot P(2) \cdot P(3) \cdot P(4) \cdot P(\langle 3 \rangle) \times P(5) \cdot P(6) \cdot P(7) \cdot P(8);$$
$$Q(\Gamma) = 0,87; \quad P(\Gamma) = 0,13.$$

22. Визначається ймовірність відмови підсистеми B и ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(B) = 1 - P(\Gamma) \cdot P(D) \cdot P(E) \cdot P(\mathcal{K});$$
$$Q(B) = 0,999; \quad P(B) = 0,001.$$

23. Визначається ймовірність відмови підсистеми B и ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(B) = 1 - P(37) \cdot P(38) \cdot P(39) \cdot P(40);$$
$$Q(B) = 0,74; \quad P(B) = 0,26.$$

24. Визначається ймовірність відмови фарбувальної лінії (системи A) і ймовірність її безвідмовної роботи:

$$Q(A) = 1 - P(B) \cdot P(B);$$
$$Q(A) = 0,99974; \quad P(B) = 0,00026.$$

Отримане значення ймовірності відмови системи свідчить про те, що система ненадійна. Показники її безвідмовності можуть бути поліпшені шляхом резервування тих ланок, імовірність відмови яких велика, з метою поліпшення показників безвідмовності найменш надійних підсистем і (або) шляхом зменшення розрахункового часу t .

На рисунку 2.7 представлено «дерево несправностей» фарбувальної лінії.

2.3.2 Розрахунки ризику травмування працівників

У процесі трудової діяльності на працівника впливають фактори виробничого середовища й трудового процесу, які можуть вплинути на здоров'я.

Опис причин виникнення травмонебезпечної ситуації

А. До впровадження заходу:

1. Імовірність травмування працівника $P_{тр.р}$ визначається ймовірністю самотравмування $P_{с.тр}$.

2. Імовірність $P_{с.тр}$ може бути обумовлено однією з наступних причин:

- отруєнням парами розчинника;
- травмуванням ніг перевезеними деталями;
- наїздом навантажувача.

$$P_{mp.p} = P_{c.mp} = (P_1 + P_2 + P_3) - P_1 \cdot P_2 - P_2 \cdot P_3 - P_3 \cdot P_1 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3;$$

$$P_{mp.p} = 5,52 \cdot 10^{-3} - 2,642 \cdot 10^{-3} + 0,21 \cdot 10^{-3} = 3,088 \cdot 10^{-3}.$$

$$R = P_{mp.p} = 3,088 \cdot 10^{-3}.$$

Таким чином, роботи на фарбувальній ділянці до впровадження заходу належать до категорії небезпечних.

Б. Після впровадження заходу:

1. Імовірність травмування працівника $P_{mp.p}$ визначається ймовірністю самотравмування $P_{c.mp}$.

2. Імовірність $P_{c.mp}$ може бути обумовлено однією з наступних причин:

- опіком рук гарячою деталлю;
- травмуванням голови;
- наїздом навантажувача.

$$P_{mp.p} = P_{c.mp} = (P_1 + P_2 + P_3) - P_1 \cdot P_2 - P_2 \cdot P_3 - P_3 \cdot P_1 + P_1 \cdot P_2 \cdot P_3;$$

$$P_{mp.p} = 0,8 \cdot 10^{-3} - 0,19 \cdot 10^{-3} + 0,012 \cdot 10^{-3} = 0,622 \cdot 10^{-3}.$$

$$R = P_{mp.p} = 0,622 \cdot 10^{-3}.$$

Отже, робота на фарбувальній лінії належить до категорії щодо безпечних.

Оцінка ефективності заходів:

$$\Delta R = R \text{ (до впровадження)} - R \text{ (після впровадження)} =$$

$$= 3,088 \cdot 10^{-3} - 0,622 \cdot 10^{-3} = 2,466 \cdot 10^{-3},$$

із цього випливає, що небезпека травмування на фарбувальній ділянці після впровадження заходу щодо поліпшення умов праці значно знизилася.

На рисунку 2.8 представлено «дерево ризиків» до й послі впровадження заходу.

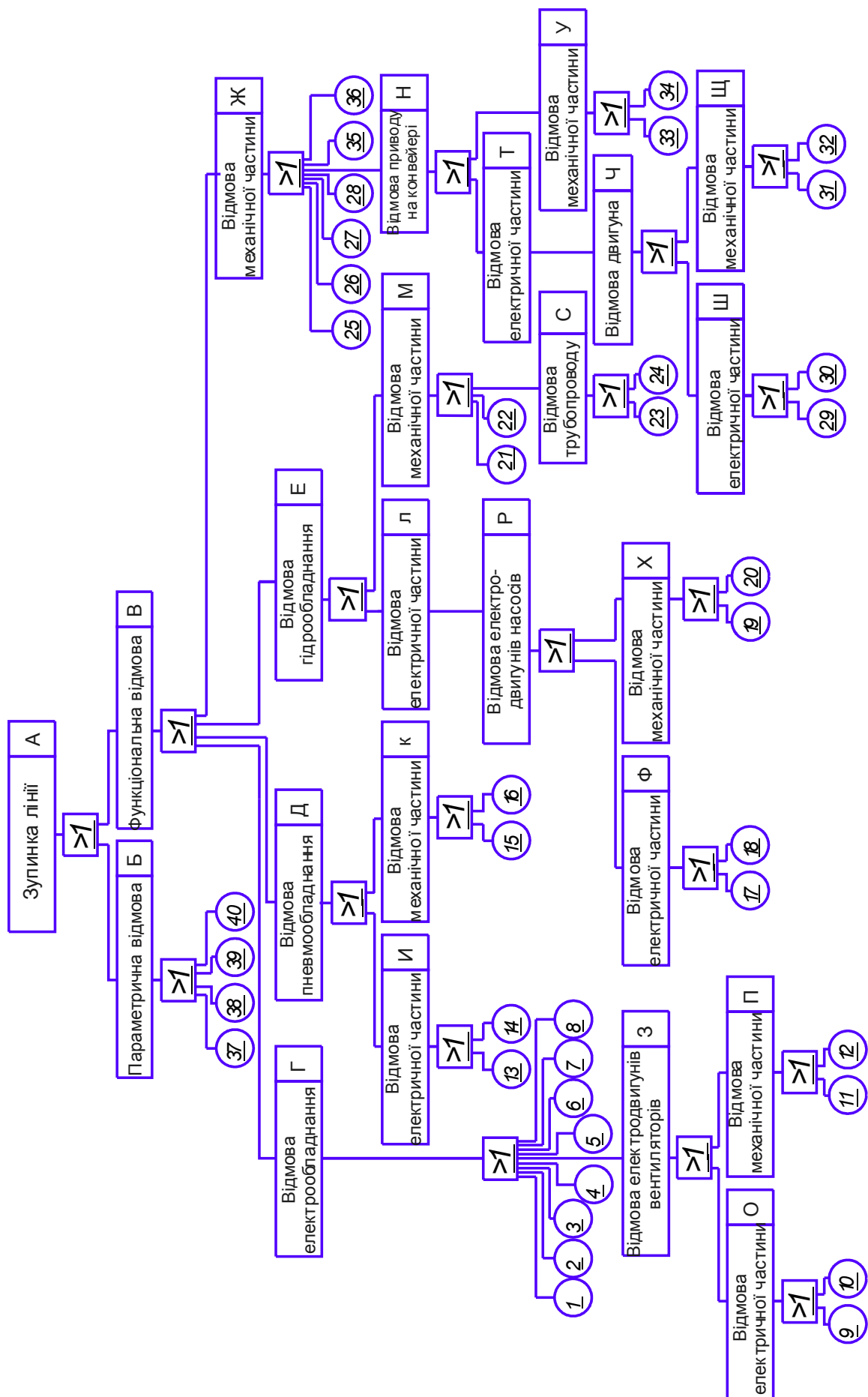


Рисунок 2.7 – «Дерево неисправностей» фарбувальної лінії

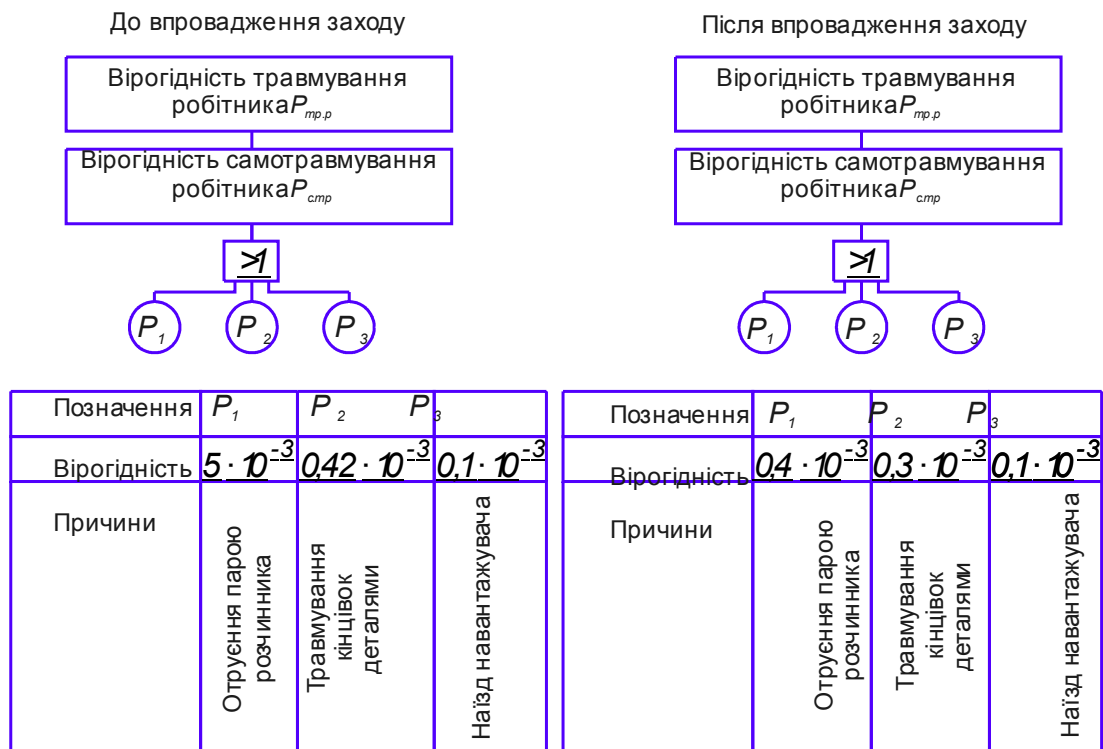


Рисунок 2.8 – «Дерево ризиків» при роботі на фарбувальній ділянці

2.4 Розрахунки надійності й ризику системи вентиляції

2.4.1 Обґрунтування необхідності розрахунків надійності й ризику

Однією з найважливіших виробничих проблем є підвищення надійності й довговічності технологічного устаткування. Чим вище продуктивність і ступінь зручності встаткування, тем важливіше забезпечити його безвідмовну роботу протягом тривалого проміжку часу.

Створення машин, приладів і встаткування, що відповідають сучасним вимогам продуктивності, точності, надійності й довговічності, супроводжується їхнім безперервним конструктивним ускладненням, що часто приводить до зворотного результату – зниженню надійності цих обладнань.

Протиріччя є й в економічних питаннях, де, як показує практика, підвищення надійності й довговічності машин приводить до збільшення їх вартості, у той час як одна з істотних економічних завдань полягає в зниженні собівартості продукції, що випускається.

Забезпечення зниження собівартості машин і встаткування – проблема всіх галузей промисловості. Однак практика показує, що необґрунтоване зниження собівартості негативно впливає на якість виробів і завдає шкоди промисловості.

Оптимізація витрати енергії у вентиляційних установках досягається різними шляхами:

- 1) застосуванням вентиляторів з найбільш високим ККД і можливістю вибору оптимальних режимів роботи;
- 2) визначенням оптимальних, доцільних економічних термінів служби верстатів;

3) правильним проектуванням вентиляційної мережі.

Як відомо, надійність об'єкта визначається в основному чотирма властивостями: безвідмовністю, довговічністю, ремонтпридатністю й сохрняємостю.

Одним з головних вимог до вентиляційної системи й усьому встаткуванню є довговічність. Довговічність системи визначається довговічністю встановлюваного в ній устаткування (вона вказується в технічній документації).

Деякі елементи систем вентиляції піддаються раптовим відмовам через простоту своєї конструкції й невисокої технологічності виробів.

Основними відмовами у вентиляційній системі є відмови електродвигуна, вентилятора.

2.4.2 Визначення значень імовірності безвідмовної роботи

Припливна вентиляція являє собою складну технічну систему, яку необхідно оцінити з погляду надійності. Система припливної вентиляції містить:

а) вентиляційну камеру, у якій є забірний пристрій, закритий сіткою або жалюзі, щоб уникнути влучення тварин і листя;

в) калорифер, що представляє собою теплообмінник, по алюмінієвих трубках якого протікає вода, нагріта до температури 70-100 градусів Цельсія, тепло передається в повітря. Калорифер з'єднується з вентилятором еластичною муфтою;

г) вентилятор, що містить корпус, робоче колесо з лопатками для подачі повітря у воздуховод і електродвигун, з'єднаний з вентилятором муфтою. Для даної вентиляційної системи обраний відцентровий вентилятор типу ВЦ 14 – 46 – 2.5, виконання 1;

д) систему керування, у складі якої є: автомат введення, магнітний пускач, теплове реле, кнопки керування й пожежне реле;

б) шибер, що захищає калорифер від заморожування.

Система вентиляції має можливість автоматичного відключення за допомогою пожежного реле у випадку виникнення пожежі. На пожежне реле подається команда від датчиків пожежної сигналізації, і реле розмикає контакти вступного автомата.

Слабкою ланкою в системі вентиляції є магнітний пускач.

Імовірність відмови роботи системи вентиляції визначається протягом $t = 10\,000$ год у зв'язку з тим, що період експлуатації технологічної установки становить 10 000 год, після чого установку зупиняють на капітальний ремонт.

Рішення:

Згідно з технічною документацією, наробіток на відмову вентилятора ВЦ 14 – 46 – 2.5 складає $T = 20\,000$ год.

Імовірність безвідмовної роботи в період нормальної експлуатації розраховують за формулою

$$P(t) = e^{-\lambda t};$$

імовірність відмови $Q(t) = 1 - P(t)$.

У першу чергу оцінюється, як залежить працездатність системи від стану елементів. Ухвалюється, що система працездатна, якщо справні всі її елементи. Система відмовила, якщо відбувся хоча б одна відмова.

Перелік відмов системи вентиляції:

- 1) коротке замикання на корпус;
- 2) відмова підшипника електродвигуна;
- 3) порушення ізоляції статора;
- 4) порушення ізоляції якоря;
- 5) відмова автомата введення;
- 6) відмова магнітного пускача;
- 7) відмова теплового реле;
- 8) відмова пожежного реле;
- 9) ушкодження кабелю;
- 10) відмова кнопки керування;
- 11) відмова сигнальної лампи;
- 12) відмова муфти;
- 13) відмова вентилятора.

Визначається ймовірність безвідмовної роботи системи вентиляції при $t = 10\,000$ год. У таблиці 2.8 наведені значення інтенсивностей відмов.

Таблиця 2.8 – Інтенсивність відмов елементів системи вентиляції

Поз.	Назва відмови	Інтенсивність відмов λ , год ⁻¹
1	Коротке замикання на корпус	$0,38 \cdot 10^{-6}$
2	Відмова підшипника електродвигуна	$5 \cdot 10^{-6}$
3	Порушення ізоляції статора	$1,5 \cdot 10^{-6}$
4	Порушення ізоляції якоря	$2,2 \cdot 10^{-6}$
5	Відмова вступного автомата	$1,1 \cdot 10^{-6}$
6	Відмова магнітного пускача	$3,8 \cdot 10^{-6}$
7	Відмова теплового реле	$1,6 \cdot 10^{-6}$
8	Відмова пожежного реле	$1,6 \cdot 10^{-6}$
9	Ушкодження кабелю	$1,0 \cdot 10^{-6}$
10	Відмова кнопки керування	$2,8 \cdot 10^{-6}$
11	Відмова сигнальної лампи	$4,0 \cdot 10^{-6}$
12	Відмова муфти вентилятора	$2,5 \cdot 10^{-6}$
13	Відмова вентилятора	$2,28 \cdot 10^{-7}$

Визначається ймовірність безвідмовної роботи елементів системи вентиляції для періоду роботи $t = 10\,000$ год:

- 1) немає короткого замикання на корпус:

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

$$\lambda = 0,38 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$

$$P(1) = e^{-0,0038} = 0,996;$$

2) немає відмови підшипника:

$$\lambda = 5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(2) = e^{-0,05} = 0,95;$$

3) немає порушення ізоляції статора:

$$\lambda = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(3) = e^{-0,015} = 0,985;$$

4) немає порушення ізоляції якоря:

$$\lambda = 2,2 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(4) = e^{-0,022} = 0,978;$$

5) немає відмови автомата введення:

$$\lambda = 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(5) = e^{-0,11} = 0,989;$$

6) немає відмови магнітного пускача:

$$\lambda = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(6) = e^{-0,038} = 0,963;$$

7) немає відмови теплового реле:

$$\lambda = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(7) = e^{-0,16} = 0,984;$$

8) немає відмови пожежного реле:

$$\lambda = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(8) = e^{-0,016} = 0,984;$$

9) немає ушкодження кабелю:

$$\lambda = 1 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1},$$
$$P(9) = e^{-0,01} = 0,99;$$

10) немає відмови кнопки керування:

$$\lambda = 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(10) = e^{-0,028} = 0,972;$$

11) немає відмови сигнальної лампи:

$$\lambda = 4 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(11) = e^{-0,04} = 0,96;$$

12) немає відмови муфти вентилятора:

$$\lambda = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(12) = e^{-0,025} = 0,975;$$

13) немає виходу з ладу вентилятора:

$$\lambda = 2,28 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1},$$
$$P(13) = e^{-0,00228} = 0,977.$$

2.4.3 Аналіз надійності вентиляційних систем методом «дерева несправностей»

Для визначення причин виникнення відмов або збоїв у роботі виробничого встаткування застосовується метод «дерева несправностей». Метод полягає в побудові й аналізі моделі надійності, що представляє собою логіко-імовірнісну модель причинно-наслідкових зв'язків відмов виробу з відмовами його елементів і іншими подіями. «Дерево несправностей» вентиляції представлено на рисунку 2.9.

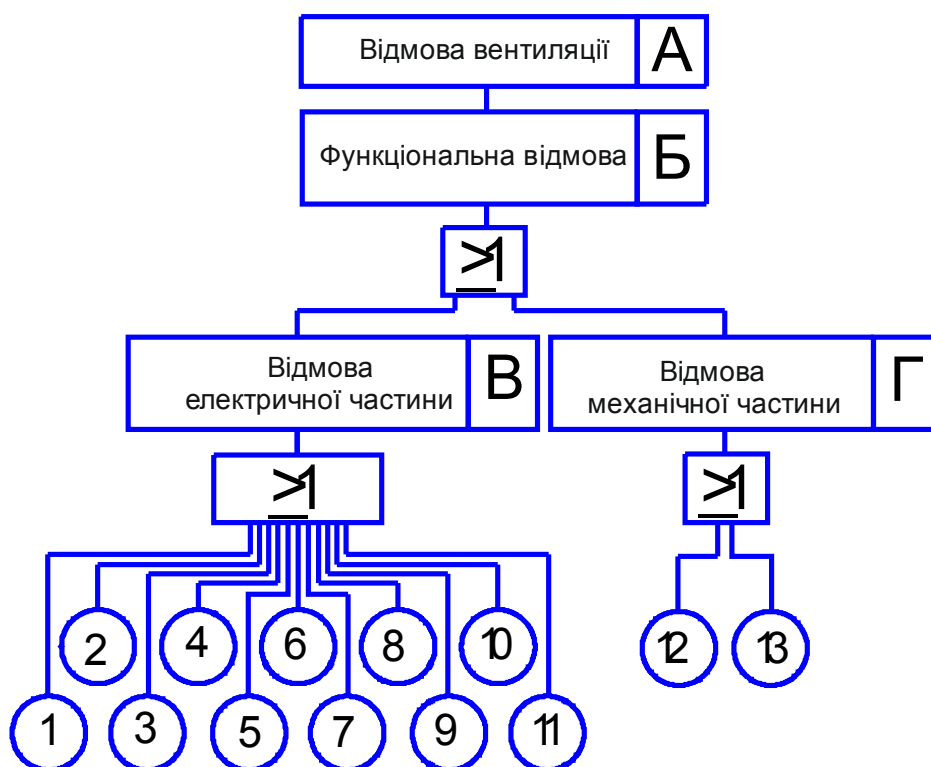


Рисунок 2.9 – «Дерево несправностей» вентиляційної системи

1. Визначається ймовірність відмови електричної частини (подія B):
 $Q(B) = 1 - P(1) \cdot P(2) \cdot P(3) \cdot P(4) \cdot P(5) \cdot P(6) \cdot P(7) \cdot P(8) \cdot P(9) \cdot P(10) \cdot P(11);$
 $Q(B) = 1 - 0,996 \cdot 0,95 \cdot 0,985 \cdot 0,978 \cdot 0,989 \cdot 0,963 \cdot 0,984 \cdot 0,984 \cdot 0,99 \times$
 $\times 0,972 \cdot 0,96 = 0,245;$

$$P(B) = 1 - Q(B) = 1 - 0,245 = 0,755.$$

2. Визначається ймовірність відмови механічної частини (подія Γ):

$$Q(\Gamma) = 1 - P(12) \cdot P(13);$$

$$Q(\Gamma) = 1 - 0,975 \cdot 0,977 = 0,046;$$

$$P(\Gamma) = 1 - Q(\Gamma) = 1 - 0,046 = 0,954.$$

3. Визначається ймовірність функціональної відмови (подія B):

$$Q(B) = 1 - P(\Gamma) \cdot P(B); \quad Q(B) = 1 - P(\Gamma) \cdot P(B);$$

$$Q(B) = 1 - 0,954 \cdot 0,755 = 0,279.$$

4. Визначається ймовірність відмови системи вентиляції (подія A):

Оскільки в даній системі відсутні параметричні відмови, то ймовірність виходу з ладу системи вентиляції визначається тільки функціональною відмовою, отже,

$$Q(A) = Q(B) = 0,279.$$

Отримані дані зведені в таблицю 2.9.

Таблиця 2.9 – Значення ймовірностей відмови й безвідмовної роботи

Подія		Ймовірність відмови Q	Ймовірність безвідмовної роботи P	Причина
Позначення на рисунку 2.9	Найменування			
1	Коротке замикання на корпус	—	0,68	Зношування ізоляції
2	Відмова підшипників	—	0,71	Відсутність змащення
3	Порушення ізоляції статора	—	0,86	Влучення пилу
4	Порушення ізоляції якоря	—	0,8	Влучення пилу
5	Відмова вступного автомата	—	0,89	Окиснення контактів
6	Відмова магнітного пускача	—	0,68	Пробій котушки
7	Відмова теплового реле	—	0,85	Залипання контактів
8	Відмова пожежного реле	—	0,85	Залипання контактів
9	Ушкодження кабелю	—	0,9	Обрив
10	Відмова кнопки керування	—	0,75	Западання кнопки
11	Відмова сигнальної лампи	—	0,96	Перегорання ламп
12	Відмова муфти	0,06	0,94	Зріз шпонки
13	Відмова вентилятора	0,21	0,79	Зношування лопат
Г	Вихід з ладу механічної частини	0,046	0,954	—
В	Відмова електричної частини	0,245	0,755	—
Б	Функціональна відмова	0,279	0,721	—
А	Відмова системи вентиляції	0,0001	0,9999	—

2.4.4 Розрахунки ймовірності заподіяння збитку здоров'ю

Професійна діяльність за ризиком загибелі людини поділяється на чотири категорії безпеки в межах від безпечної при $R < 10^{-4}$ до особливо небезпечної при $R > 10^{-2}$.

Показники для розрахунків узяті зі статистики підприємства й представлені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Імовірність подій, що приводять до заподіяння збитку здоров'ю апаратника

№ з/п	Подія	Імовірність $P(t)$
1	Падіння працівника з висоти	$5 \cdot 10^{-5}$
2	Наїзд на працівника автотранспорту	$2,3 \cdot 10^{-5}$
3	Стиснення працівника вантажем	$3,4 \cdot 10^{-4}$

$$P_{m\bar{o}} = (P_1 + P_2 + P_3) - P_1 P_2 - P_2 P_3 - P_3 P_1 + P_1 P_2 P_3;$$

$$P_{m\bar{o}} = (5 \cdot 10^{-5} + 2,3 \cdot 10^{-5} + 3,4 \cdot 10^{-4}) - 5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,3 \cdot 10^{-5} - 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 3,4 \cdot 10^{-4} - 3,4 \cdot 10^{-4} \cdot 5 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} \cdot 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 3,4 \cdot 10^{-4} = 8,2 \cdot 10^{-4};$$

$$P_{m\bar{o}} = R;$$

$$R = 8,2 \cdot 10^{-4}.$$

Таким чином, ризик заподіяння збитку здоров'ю: $R = 8,2 \cdot 10^{-4}$.

«Дерево ризиків» показане на рисунку 2.10.

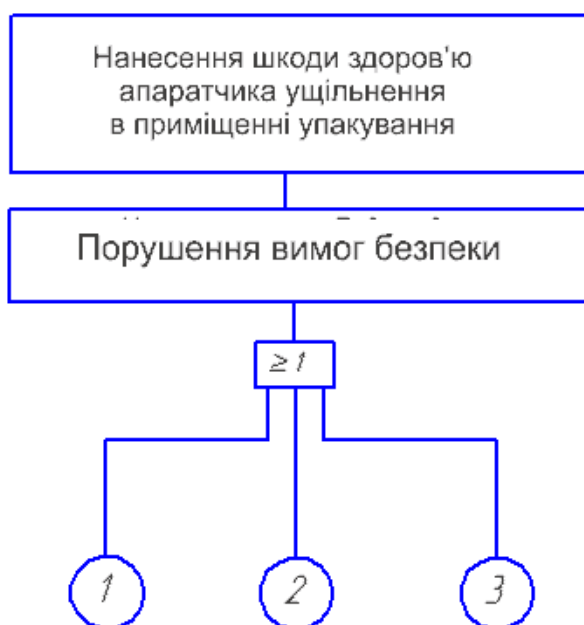


Рисунок 2.10 – «Дерево ризиків» заподіяння збитку здоров'ю

Професійна діяльність апаратника ущільнення технічного вуглецю відноситься до другої категорії безпеки як відносно безпечна робота з $R = 10^{-4} - 10^{-3}$.

2.5 Аналіз надійності системи газопостачання встаткування

2.5.1 Опис системи газопостачання

Розглядається типова схема централізованого газопостачання постів, зображених на рисунку 2.11.

Кисень надходить до стаціонарних робочих постів по газопроводу 11 від відповідного джерела живлення (газифікатор). Пропан надходить по газопроводу 6 з підземного резервуара ємністю 4,2 м³. Пропан подається безпосередньо в цеховий газопровід. На вході трубопроводу пропану в цех встановлюється центральний запобіжний сухий затвор 1 (запірна арматура), призначений для захисту міжцехового газопроводу від проникнення в нього зворотного удару полум'я. Безпосередньо за затвором (по ходу газу) на введенні газу в цех встановлюється шафа 2 уведення пропану із запірним вентилям і манометром, які повинні розташовуватися в доступному й зручному місці. Запірні вентиля 1 встановлюють також на відгалуженнях трубопроводу пропану, призначених для подачі пропану на окремі ділянки цеху.

До трубопроводу пропану приєднаний через запірний вентиль трубопровід 6П для скидання продувних газів в атмосферу. Сбросной трубопровід розташовується не менш чому на 1000 мм вище перекриття. Аналогічно до киснепроводу приєднується сбросной трубопровід 11П через запірний вентиль 13.

На вході киснепроводу в цех, так само як і на кожному відгалуженні внутрішньоцехового розведення газопроводів, встановлюється запірна арматури.

У місцях споживання газів на газопроводах пропану й кисню встановлені газоподібні пости 5 і 12, до складу яких входять відповідні запірні запобіжні обладнання, що регулюють і, що забезпечують нормальну роботу вогневої апаратури. Живлення її киснем ведеться від редуктора БКО (балонного кисневого однокамерного) газоподібного поста. Тиск кисню в газопроводі не може бути вище 1,6 МПа (16 кгс/см²).

До трубопроводу пропану приєднання інструмента (різака) здійснюється через запобіжне обладнання – зворотний клапан. При харчуванні цехових газопроводів для пропану від пропускних рамп тиск у трубопроводі пропану не може перевищити 0,07 МПа (0,7 кгс/см²), тому застосовують газорозбірні пости з рідинним або сухим затвором. Запобіжні постові затвори повинні відповідати максимально можливому тиску в трубопроводі пропану й витраті газу апаратурою.

Параметричною відмовою в даній системі буде зниження тиску внаслідок переливу або недоливу суміші пропану середнього тиску або ж підвищення температури, викликане підвищенням температури навколишнього середовища. «Дерево несправностей» зображене на рисунку 2.12.

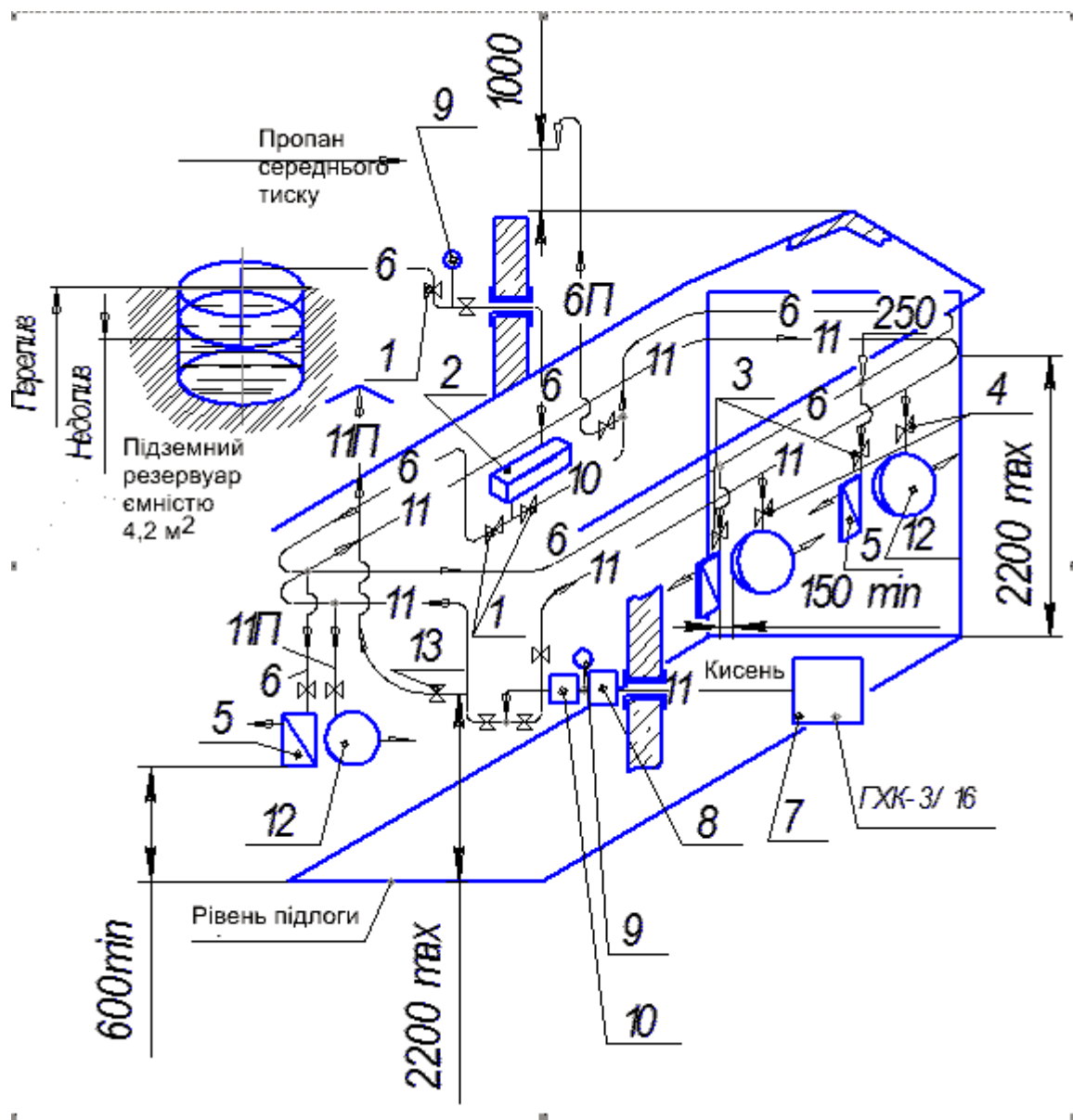


Рисунок 2.11 – Схема централізованого постачання газорізальних постів пропаном і киснем:

1 – запірні арматури; 2 – шафа введення пропану; 3 – зворотний клапан;
 4 – клапан зворотний вогнеперешкодний; 5 – газоподібний пост пропану;
 6 – газопровід пропану; 7 – ГХК-3/16 (газифікатор холодний криогенний);
 8 – регулятор тиску; 9 – дифманометр; 10 – редуктор БКО; 11 – газопровід кисню; 11П – трубопровід для скидання кисню; 6П – газопровід для скидання пропану; 12 – газоподібний пост кисню; 13 – вентиль для кисню

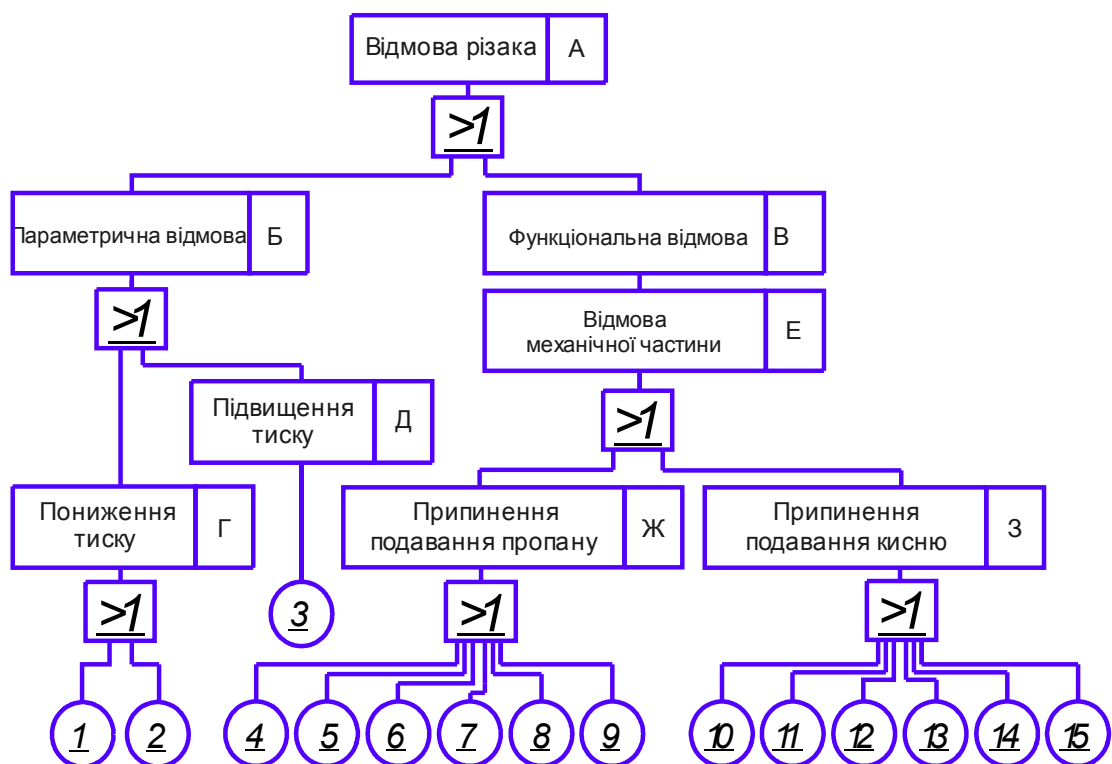


Рисунок 2.12 – «Дерево несправностей» системи газопостачання

2.5.2 Визначення ймовірності відмови системи газопостачання

Таблиця 2.11 – Інтенсивність відмов елементів системи газопостачання

Позиція	Найменування відмови	Інтенсивність відмов λ , год ⁻¹
1	Недолив суміші	$2 \cdot 10^{-6}$
2	Перелив суміші	$2 \cdot 10^{-6}$
3	Підвищення температури	$1 \cdot 10^{-7}$
4	Відмова запірної арматури	$1,65 \cdot 10^{-7}$
5	Відмова шафи введення пропану	$1,12 \cdot 10^{-6}$
6	Відмова поста газорозподільного	$1,1 \cdot 10^{-6}$
7	Відмова клапана зворотного	$1 \cdot 10^{-7}$
8	Відмова клапана зворотного вогнеперешкодного	$1,1 \cdot 10^{-6}$
9	Відмова трубопроводу пропану	$3 \cdot 10^{-6}$
10	Відмова запірної арматур	$1,65 \cdot 10^{-7}$
11	Відмова газифікатора холодного криогенного ГХК-3/1,6	$1,12 \cdot 10^{-6}$
12	Відмова регулятора тиску	$1 \cdot 10^{-8}$
13	Відмова диференціального манометра	$2 \cdot 10^{-8}$
14	Відмова редуктора БКО	$1 \cdot 10^{-8}$
15	Відмова трубопроводу кисню	$3 \cdot 10^{-6}$

Для того щоб визначити ймовірність відмови системи газопостачання, необхідно визначити ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента даної системи.

Ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента визначається за формулою

$$P(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp(-\lambda t),$$

де t – наробіток до відмови і-го виробу.

Визначається ймовірність безвідмовної роботи елементів системи для $t = 10000$ год й $t = 20000$ год.

Для $t = 10000$ год:

$$\begin{aligned} P_1 &= e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,98; \\ P_2 &= e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,98; \\ P_3 &= e^{-1 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4} = 0,999; \\ P_4 &= e^{-1,65 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4} = 0,998; \\ P_5 &= e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,989; \\ P_6 &= e^{-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,989; \\ P_7 &= e^{-1 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4} = 0,999; \\ P_8 &= e^{-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,989; \\ P_9 &= e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,97; \\ P_{10} &= e^{-1,65 \cdot 10^{-7} \cdot 10^4} = 0,998; \\ P_{11} &= e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,989; \\ P_{12} &= e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4} = 0,9999; \\ P_{13} &= e^{-2 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4} = 0,9998; \\ P_{14} &= e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4} = 0,9999; \\ P_{15} &= e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^4} = 0,97; \end{aligned}$$

Для $t = 20000$ год:

$$\begin{aligned} P_1 &= e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,96; \\ P_2 &= e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,96; \\ P_3 &= e^{-2 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,998; \\ P_4 &= e^{-1,65 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,997; \\ P_5 &= e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,978; \\ P_6 &= e^{-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,978; \\ P_7 &= e^{-1 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,998; \\ P_8 &= e^{-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,978; \\ P_9 &= e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,942; \\ P_{10} &= e^{-1,65 \cdot 10^{-7} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,997; \\ P_{11} &= e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,978; \\ P_{12} &= e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,9998; \\ P_{13} &= e^{-2 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,9996; \\ P_{14} &= e^{-1 \cdot 10^{-8} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,9998; \\ P_{15} &= e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 0,942; \end{aligned}$$

Для $t = 10000$ год:

Ймовірність відмови підсистеми 3:

$$\begin{aligned} Q_3 &= 1 - P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15}; \\ Q_3 &= 1 - 0,998 \cdot 0,989 \cdot 0,9999 \cdot 0,9998 \cdot 0,9999 \cdot 0,97 = 0,043; \\ P_3 &= 1 - Q_3 = 0,957. \end{aligned}$$

Імовірність відмови підсистеми Ж:

$$Q_{\text{Ж}} = 1 - P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9;$$
$$Q_{\text{Ж}} = 1 - 0,998 \cdot 0,989 \cdot 0,989 \cdot 0,999 \cdot 0,989 \cdot 0,97 = 0,064;$$
$$P_{\text{Ж}} = 1 - Q_{\text{Ж}} = 0,936.$$

Імовірність відмови підсистеми Е:

$$Q_E = 1 - P_{\text{Ж}} \cdot P_3;$$
$$Q_E = 1 - 0,936 \cdot 0,957 = 0,104.$$

Імовірність функціональної відмови В:

$$Q_B = Q_E = 0,104;$$
$$P_B = 1 - Q_B = 0,896.$$

Імовірність відмови підсистеми Г:

$$Q_{\Gamma} = 1 - P_1 \cdot P_2;$$
$$Q_{\Gamma} = 1 - 0,98 \cdot 0,98 = 0,03;$$
$$P_{\Gamma} = 1 - Q_{\Gamma} = 1 - 0,03 = 0,97.$$

Імовірність відмови підсистеми Д:

$$Q_D = Q_3 = 1 - P_3;$$
$$Q_D = 1 - 0,999 = 0,001;$$
$$P_D = 1 - Q_D = 1 - 0,001 = 0,999.$$

Імовірність відмови підсистеми Б:

$$Q_B = 1 - P_{\Gamma} \cdot P_D;$$
$$Q_B = 1 - 0,97 \cdot 0,999 = 0,031;$$
$$P_B = 1 - Q_B = 1 - 0,031 = 0,969.$$

Розраховується ймовірність відмови різака, тобто ймовірність відмови системи газопостачання А:

$$Q_A = 1 - P_B \cdot P_{\Gamma};$$
$$Q_A = 1 - 0,969 \cdot 0,896 = 0,13.$$

Для $t = 20000$ год:

Імовірність відмови підсистеми З:

$$Q_3 = 1 - P_{10} \cdot P_{11} \cdot P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15};$$
$$Q_3 = 1 - 0,997 \cdot 0,978 \cdot 0,9998 \cdot 0,9996 \cdot 0,9998 \cdot 0,942 = 0,082;$$
$$P_3 = 1 - Q_3 = 0,917.$$

Імовірність відмови підсистеми Ж:

$$Q_{\text{Ж}} = 1 - P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 \cdot P_7 \cdot P_8 \cdot P_9;$$
$$Q_{\text{Ж}} = 1 - 0,997 \cdot 0,978 \cdot 0,978 \cdot 0,998 \cdot 0,978 \cdot 0,942 = 0,123;$$
$$P_{\text{Ж}} = 1 - Q_{\text{Ж}} = 0,876.$$

Імовірність відмови підсистеми Е:

$$Q_E = 1 - P_{\text{Ж}} \cdot P_3;$$
$$Q_E = 1 - 0,876 \cdot 0,917 = 0,197.$$

Імовірність функціональної відмови B :

$$Q_B = Q_E = 0,197;$$

$$P_B = 1 - Q_B = 0,803.$$

Імовірність відмови підсистеми Γ :

$$Q_\Gamma = 1 - P_1 \cdot P_2;$$

$$Q_\Gamma = 1 - 0,96 \cdot 0,96 = 0,078;$$

$$P_\Gamma = 1 - Q_\Gamma = 1 - 0,078 = 0,922.$$

Імовірність відмови підсистеми D :

$$Q_D = Q_3 = 1 - P_3;$$

$$Q_D = 1 - 0,998 = 0,002;$$

$$P_D = 1 - Q_D = 1 - 0,002 = 0,998.$$

Імовірність відмови підсистеми B :

$$Q_B = 1 - P_\Gamma \cdot P_D;$$

$$Q_B = 1 - 0,922 \cdot 0,998 = 0,079;$$

$$P_B = 1 - Q_B = 1 - 0,079 = 0,92.$$

Імовірність відмови системи A визначається по формулі

$$Q_A = 1 - \prod_{i=1}^n P_i;$$

$$Q_A = 1 - P_B \cdot P_B;$$

$$Q_A = 1 - 0,92 \cdot 0,803 = 0,26.$$

Усі значення ймовірності відмов системи зведені в таблицю 2.12.

Таблиця 2.12 – Значення ймовірностей відмов системи

№ з/п	Подія	Значення	
		$T = 10000$ год	$T = 20000$ год
1	Припинення подачі кисню	0,043	0,082
2	Припинення подачі пропану	0,064	0,123
3	Вихід з ладу механічної частини	0,104	0,197
4	Функціональна відмова	0,104	0,197
5	Зниження тиску	0,03	0,078
6	Підвищення тиску	0,001	0,083
7	Параметрична відмова	0,031	0,079
8	Відмова різача	0,13	0,26

На підставі аналізу ймовірності відмови системи газопостачання на підприємстві для наробітків $T = 10000$ год і $T = 20000$ год робиться висновок, що дана система надійна. Для наробітку $T = 10000$ год імовірність відмови менше, чим для наробітку $T = 20000$ год.

2.5.3 Розрахунки ймовірності заподіяння збитку здоров'ю

Таблиця 2.13 – Імовірність подій, що приводять до заподіяння збитку здоров'ю електрогазозварника

Позиція	Подія	Імовірність P
1	Дотик до струмоведучих частин верстата	$5 \cdot 10^{-5}$
2	Порушення вимог безпеки	$2 \cdot 10^{-4}$
3	Виконання робіт без зварювальної маски	$2 \cdot 10^{-5}$
4	Незастосування засобів індивідуального захисту	$4 \cdot 10^{-5}$
5	Одержання травм при виконанні зварювальних робіт	$3 \cdot 10^{-5}$
6	Одержання травм при виконанні підготовчо-заключних операцій	$2 \cdot 10^{-4}$
7	Влучення розпечених стружок на легкозаймистий матеріал	$4 \cdot 10^{-5}$
8	Витік газу з балона	$3 \cdot 10^{-4}$
9	Влучення розпечених крапель металу й іскор на відкриті частини тіла	$2 \cdot 10^{-4}$
10	Зіткнення з відкритим полум'ям	$2 \cdot 10^{-5}$
11	Перевищення концентрації марганцю й диоксиду кремнію (у зварювальних аерозолях) у повітрі робочої зони	$5 \cdot 10^{-4}$
12	Витік газу з балона	$3 \cdot 10^{-6}$
13	Виникнення вибухонебезпечної концентрації	$4 \cdot 10^{-5}$
14	Робота поблизу горючих речовин	$3 \cdot 10^{-4}$
15	Наявність джерела вогню	$5 \cdot 10^{-4}$

$$R_A = 1 - \prod_{i=B}^3 (1 - P_i) = 1 - (1 - P_B) \cdot (1 - P_B) \cdot (1 - P_\Gamma) \cdot (1 - P_D) \times$$

$$\times (1 - P_E) \cdot (1 - P_{\mathcal{K}}) \cdot (1 - P_3);$$

$$P_B = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2;$$

$$P_B = P_3 + P_4 - P_3 \cdot P_4;$$

$$P_\Gamma = P_5 + P_6 - P_5 \cdot P_6;$$

$$P_D = P_7 + P_8 - P_7 \cdot P_8;$$

$$P_E = P_9 + P_{10} - P_9 \cdot P_{10};$$

$$P_{\mathcal{K}} = P_{11} + P_{12} - P_{11} \cdot P_{12};$$

$$P_A = P_B + P_B - P_B \cdot P_B;$$

$$P_B = 5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 2,5 \cdot 10^{-4};$$

$$P_B = 2 \cdot 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 10^{-5} \cdot 4 \cdot 10^{-5} = 8 \cdot 10^{-4};$$

$$P_\Gamma = 3 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-5} - 3 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 6 \cdot 10^{-4};$$

$$\begin{aligned}
P_D &= 4 \cdot 10^{-5} + 3 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 3,4 \cdot 10^{-4}; \\
P_E &= 2 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^{-4} = 4 \cdot 10^{-5}; \\
P_{\text{Ж}} &= 5 \cdot 10^{-4} + 3 \cdot 10^{-6} - 5 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 10^{-6} = 5 \cdot 10^{-4}; \\
P_3 &= 4 \cdot 10^{-5} + 3 \cdot 10^{-6} - 4 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot 10^{-6} = 4,3 \cdot 10^{-5}; \\
R_A &= 1 - (1 - 2,5 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 8 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-4}) \cdot (1 - 3,4 \cdot 10^{-4}) \times \\
&\times (1 - 5 \cdot 10^{-5}) \cdot (1 - 6 \cdot 10^{-12}) \cdot (1 - 4,3 \cdot 10^{-5}) = 2,08 \cdot 10^{-3}.
\end{aligned}$$

Ризик заподіяння шкоди здоров'ю $R_A = 2,08 \cdot 10^{-3}$ («дерево ризиків» – на рисунку 2.13)

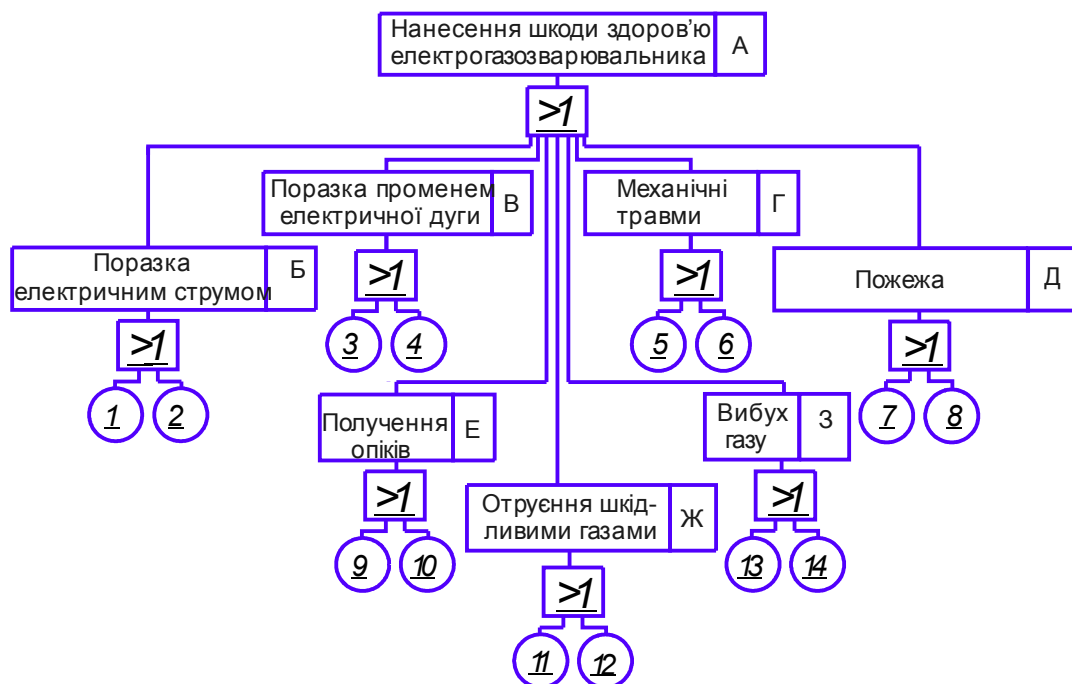


Рисунок 2.13 – «Дерево ризиків» заподіяння шкоди здоров'ю електрогазозварника

Аналіз надійності

Безпека – стан захищеності життєво важливих інтересів особистості, суспільства й держави від внутрішніх і зовнішніх погроз.

Важливим питанням є забезпечення безпеки при використанні різного встаткування (верстати, агрегати, машини і т.д.).

Визначення безпеки встаткування досить складний процес. Існує безліч способів, але найбільше часто використовуваним є метод «дерева несправностей».

«Дерево несправностей» – це топологічна модель надійності й безпеки, яка відбиває логіко-імовірнісні взаємозв'язки між окремими випадковими вихідними подіями у вигляді первинних відмов або результируючих відмов, сукупність яких приводить до головної аналізованої події [11].

Аналіз «дерева несправностей» пов'язаний з визначенням можливості появи або не появи головної події – події конкретного типу. Дані умови встановлюються шляхом виділення із усього масиву вихідних передумов двох підмножин, реалізація яких або приводить, або не приводить до виникнення головної події. Такі підмножини діляться:

- на *аварійні комбінації* – це певний набір вихідних подій. Якщо всі ці вихідні події трапляються, існує гарантія, що кінцева подія відбувається;
- *відсічні комбінації* – набір вихідних подій, який гарантує відсутність головної події за умови не виникнення жодного зі складових цієї набір подій. Самим зручним способом виявлення умов виникнення й попередження подій є виділення з таких підмножин так званих *мінімальних комбінацій подій*, тобто тих з них, поява яких є мінімально необхідною й досить для досягнення бажаного результату.

Кількісний аналіз аварійності й травматизму за допомогою структурних функцій здійснюється в наступній послідовності:

- модель ділиться на окремі блоки;
- в обраних блоках виділяються підмножини подій, з'єднаних умовами «ТА» і «АБО»;
- вихідне «дерево» і відповідна йому структурна функція спрощуються за рахунок їх укрупнення;
- розраховується захід можливості виникнення події.

При оцінці числових характеристик досліджуваного «дерева несправностей» керуються рядом *правил і допущень*.

1. Події «дерева», з'єднані логічною умовою «ТА», поєднуються за принципом їх перемножування, при цьому вважається, що параметр головної події розраховується як добуток з n параметрів передумов (співмножників):

$$P = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{i=1}^n P_i$$

2. Події «дерева», з'єднані логічною умовою «АБО», поєднуються за принципом логічного додавання, а їх відповідні параметри утворюють наступну алгебраїчну залежність:

$$P = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i)$$

яка в окремих випадках, наприклад, для $n = 2$ і $n = 3$, приймає вид:

$$P_{i=2} = P_1 + P_2 - P_1 \cdot P_2;$$

$$P_{i=3} = P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_3 - P_2 P_3 - P_3 P_1 + P_1 P_2 P_3.$$

3. Перетворення й спрощення структурних функцій здійснюється з дотриманням основних правил *булевої алгебри*. Відповідно до закону поглинання слухні, наприклад, такі рівності:

$$A \cdot (A \cdot B) = A \cdot B;$$

$$A + (A \cdot B) = A.$$

4. При відомих структурних схемах безвідмовності технічних систем і безпеки функціонування вони можуть бути легко перетворені в «дерево подій». При цьому їх паралельно з'єднані елементи відповідають логічній операції «ТА», а послідовно з'єднані – логічній операції «АБО».

При аналізі методом «дерева несправностей» виявляються комбінації відмов (неполадок) устаткування, помилок персоналу й зовнішніх (техногенних, природних) впливів, що приводять до основної події (аварійної ситуації). Метод використовується для аналізу виникнення аварійної ситуації й розрахунків її ймовірності (на основі завдання значень імовірності вихідних подій).

2.6 Аналіз ризику вусорізної пилки

2.6.1. «Дерево несправностей» вусорізної пилки

Головна подія A – зупинка верстата; система B – відмова механічної частини, включає підсистеми: Γ (відмова поворотного механізму), Δ (відмова механізму повороту й висоти), E (відмова захисного кожуха), \mathcal{J} (руйнування порожньої циліндричної стійки). Система B – відмова електричної частини, складається з підсистем: \mathcal{Z} (відмова електродвигуна), \mathcal{I} (відмова струмоведучих частин), K (включення запобіжних обладнань).

Проводяться розрахунки ймовірності відмови системи. Інтенсивність відмов для даного «дерева» представлена в таблиці 2.14. Спочатку необхідно виявити ймовірність безвідмовної роботи кожного елемента в період гарантованого терміну служби, яка визначається по формулі

$$P_i(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t) dt\right) = \exp(-\lambda t).$$

Таблиця 2.14 – Інтенсивність відмов елементів вусорізної пилки

Позиція	Найменування відмови	Інтенсивність відмов λ , год ⁻¹
1	Руйнування ріжучого диска	$0,3 \cdot 10^{-4}$
2	Руйнування поворотної пружини	$1,1 \cdot 10^{-6}$
3	Заклинювання ролика поворотного механізму	$0,8 \cdot 10^{-5}$
4	Відмова фіксатора положення	$2,2 \cdot 10^{-5}$
5	Відмова фіксатора висоти	$2,2 \cdot 10^{-5}$
6	Відмова зубчастої передачі	$1,4 \cdot 10^{-5}$
7	Руйнування пружини	$1,1 \cdot 10^{-6}$
8	Відмова кожуха	$2,6 \cdot 10^{-6}$
9	Руйнування шарніра в системі важелів	$0,025 \cdot 10^{-6}$
10	Руйнування кріплення диска	$2,6 \cdot 10^{-6}$
11	Пробій ізоляції в обмотці електродвигуна	$2,2 \cdot 10^{-6}$
12	Замикання на корпус	$3 \cdot 10^{-7}$
13	Відмова кінцевого вимикача	$3 \cdot 10^{-5}$
14	Відмова теплового реле	$1,3 \cdot 10^{-5}$
15	Відмова запобіжника	$1,5 \cdot 10^{-5}$

Термін служби усередньої пилки становить 3000 год. З урахуванням нерівномірності розподілу відмов у різні періоди часу від початку експлуатації до вироблення ресурсу верстата t у розрахунках ухвалюється рівним 300 год (час між технологічним оглядом устаткування й поточним ремонтом).

Визначення ймовірності безвідмовної роботи елементів:

$$\begin{aligned} P(1) &= \exp(-0,3 \cdot 10^{-4} \cdot 300) = 0,991; & P(9) &= \exp(-0,025 \cdot 10^{-6} \cdot 300) = 0,999; \\ P(2) &= \exp(-0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,997; & P(10) &= \exp(-0,025 \cdot 10^{-6} \cdot 300) = 0,999; \\ P(3) &= \exp(-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,993; & P(11) &= \exp(-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 300) = 0,999; \\ P(4) &= \exp(-2,2 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,993; & P(12) &= \exp(-3 \cdot 10^{-7} \cdot 300) = 0,999; \\ P(5) &= \exp(-1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,995; & P(13) &= \exp(-3 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,991; \\ P(6) &= \exp(-0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,997; & P(14) &= \exp(-1,3 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,996; \\ P(7) &= \exp(-1,1 \cdot 10^{-6} \cdot 300) = 0,997; & P(15) &= \exp(-1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 300) = 0,994. \\ P(8) &= \exp(-2,6 \cdot 10^{-6} \cdot 300) = 0,999; \end{aligned}$$

Складаються рівняння ймовірностей відмов усіх підсистем вусередній пилки:

$$\begin{aligned} Q(A) &= 1 - P(B) \cdot P(B); \\ Q(B) &= 1 - P(1) \cdot P(\Gamma) \cdot P(D) \cdot P(E) \cdot P(\mathcal{K}); \\ Q(B) &= 1 - P(3) \cdot P(I); \\ Q(\Gamma) &= 1 - P(2) \cdot P(3); \\ Q(D) &= 1 - P(4) \cdot P(5) \cdot P(6); \\ Q(E) &= 1 - P(7) \cdot P(8); \\ Q(\mathcal{K}) &= 1 - P(9) \cdot P(10); \\ Q(3) &= 1 - P(11) \cdot P(K); \\ Q(I) &= 1 - P(12) \cdot P(13); \\ Q(K) &= 1 - P(14) \cdot P(15). \end{aligned}$$

Визначається ймовірність відмови підсистем:

$$\begin{aligned} Q(K) &= 1 - 0,996 \cdot 0,994 = 0,0006; \\ Q(I) &= 1 - 0,999 \cdot 0,991 = 0,01; \\ Q(\mathcal{K}) &= 1 - 0,999 \cdot 0,999 = 0,002; \\ Q(E) &= 1 - 0,997 \cdot 0,999 = 0,004; \\ Q(D) &= 1 - 0,993 \cdot 0,995 \cdot 0,997 = 0,015; \\ Q(\Gamma) &= 1 - 0,997 \cdot 0,993 = 0,01. \end{aligned}$$

Визначаються ймовірності безвідмовної роботи підсистем $\Gamma, D, E, \mathcal{K}, K, I$:

$$\begin{aligned} P(\Gamma) &= 1 - 0,01 = 0,99; \\ P(D) &= 1 - 0,015 = 0,985; \\ P(E) &= 1 - 0,004 = 0,996; \\ P(\mathcal{K}) &= 1 - 0,002 = 0,998; \\ P(K) &= 1 - 0,0006 = 0,9994; \\ P(I) &= 1 - 0,01 = 0,99. \end{aligned}$$

Визначаються ймовірності відмов підсистем $3, B, B$:

$$Q(3) = 1 - P(11) \cdot P(K) = 1 - 0,999 \cdot 0,9994 = 0,001;$$

$$Q(B) = 1 - P(3) \cdot P(I) = 1 - (1 - Q(3)) \cdot P(I) = 1 - (1 - 0,001) \cdot 0,99 = 0,01;$$

$$Q(B) = 1 - P(1)P(\Gamma)P(D)P(E)P(\mathcal{K}) = 1 - 0,991 \cdot 0,99 \cdot 0,985 \cdot 0,996 \cdot 0,998 = 0,039.$$

Визначається ймовірність відмови системи A :

$$Q(A) = 1 - P(B) \cdot P(B) = 1 - (1 - Q(B))(1 - Q(B)) = 1 - (1 - 0,039)(1 - 0,001) = 0,04.$$

«Дерево несправностей» показано на рисунку 2.14.

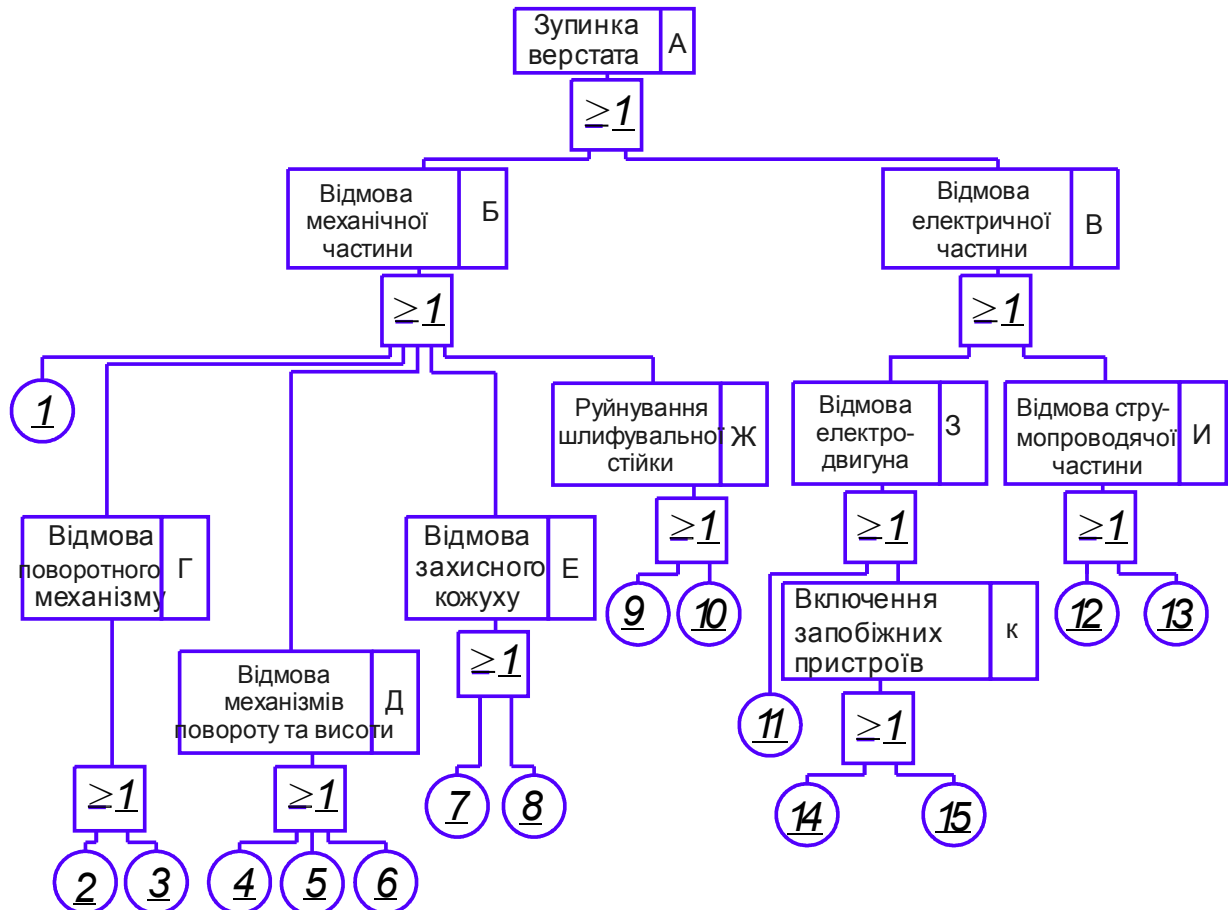


Рисунок 2.14 – «Дерево несправностей» вусорізної пилки

2.6.2 Аналіз ризику травмування збирача конструкцій ПВХ при роботі з вусорізною пилкою

Оцінка безпеки за критерієм ризику містить у собі наступні етапи:

- визначення повної групи подій ризику й оцінка відповідних імовірностей їх виникнення, з урахуванням людського фактора;
- імовірнісна оцінка кожного виду відмови критичного елемента;
- оцінка й підсумовування ризиків;
- зіставлення розрахункових ризиків із припустимими або нормативними.

Метою оцінки ризику є усунення професійних ризиків, що повинне бути головним завданням, хоча цього не завжди вдається досягти на практиці. У

випадках, коли неможливо усунути ризик, необхідно зменшити його обсяг, а ризик, що залишився, слід контролювати.

Технічний ризик (R) можна виразити формулою

$$R = Q \cdot p,$$

де Q – імовірність події; p – кількість загублених грошей або жертв у результаті однієї небажаної події.

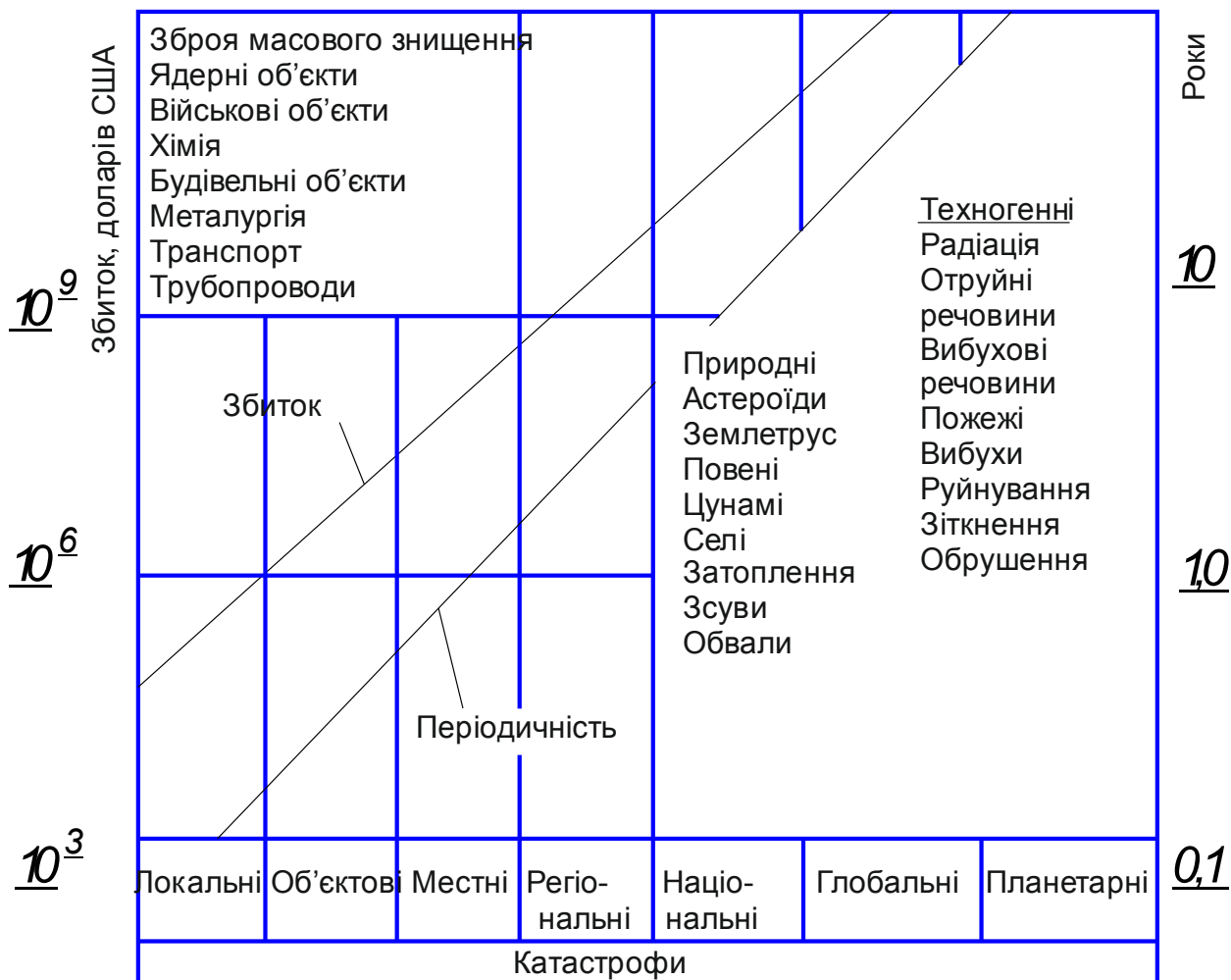


Рисунок 2.15 – Збитки й періодичність техногенних аварій

Існує безліч видів поділів професійної діяльності за класом професійного ризику, які як ураховують шкоду від здійснення події, так і уніфікують його.

У середньому в останні роки на одну національну катастрофу доводиться 5 регіональних, близько 100 місцевих і близько 500 об'єктових. Згідно рисунку 2.15, сукупний збиток від одиничних аварій може становити від $2 \cdot 10^8$ дол. США/рік до $5 \cdot 10^5$ дол. США/рік. У якості припустимого рівня використовується величина ризику $R = 1 \cdot 10^3$ дол. США /рі

У травні 2009 р. набув чинності «Технічний регламент про вимоги пожежної безпеки» [12]. Згідно із цим документом, пожежна безпека об'єкта вважається забезпеченою:

- якщо в повному обсязі виконані обов'язкові вимоги пожежної безпеки, установлені Технічним регламентом, і використовуються рекомендовані положення нормативних документів по пожежній безпеці;

- пожежний ризик не перевищує припустимих значень, установлених зазначеним вище регламентом або спеціальними технічними регламентами.

Аналіз ризику травмування збирача конструкцій ПВХ проводиться методом побудови «дерева ризиків» (рисунок 2.16).

Імовірність подій і збиток від них представлені в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Вихідні дані для побудови «дерева ризиків»

№ з/п	Подія	Імовірність події	Кількість днів непрацездатності	Економічний збиток*, грн.
1	Пожежа	$3 \cdot 10^{-8}$	–	60 109
2	Опik	0,05	1	40 681
3	Вивихи й переломи	0,03	30	122 043
4	Летальний результат	0,001	–	385 230
5	Порізи	0,12	3	122 043
6	Забиті місця	0,11	1	40 681
7	Побутові травми	0,02	1	40 681

* Розрахунки економічного збитку для підприємства зроблені з урахуванням витрат, пов'язаних з оплатою лікарняних аркушів.

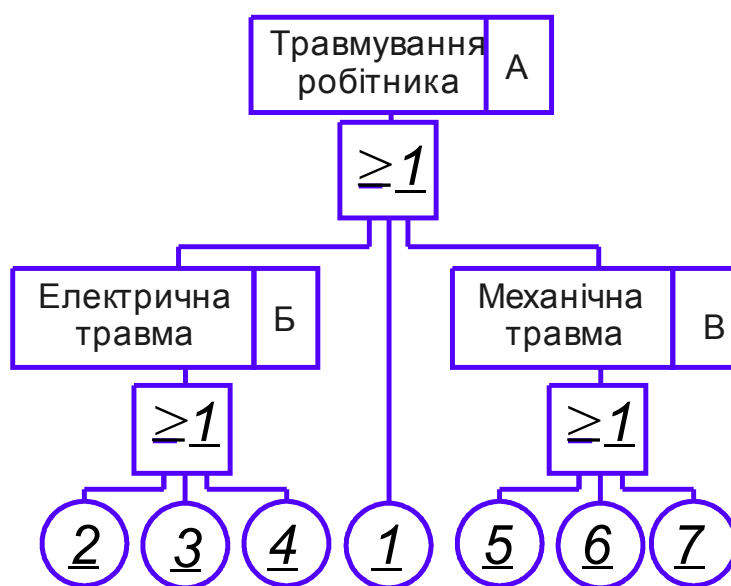


Рисунок 2.16 – «Дерево ризиків» травмування збирача конструкцій ПВХ

Розраховують ризик травмування в кожному з можливих випадків, у тому числі й внаслідок пожежі.

У нашому випадку на підприємстві в повному обсязі дотримані вимоги пожежної безпеки (є система запобігання пожежі, система протипожежного захисту, система організаційно-технічних заходів), але, навіть враховуючи це,

при розгляді ризику травмування працівника виключати ризик ушкодження в результаті пожежі не впливає.

Норми ризику від пожежі, наведені в [12], становлять для населення $1 \cdot 10^{-6}$, себто загибель не більш однієї людини на мільйон при пожежі припустима; для підприємств із врахуванням їх особливостей – $1 \cdot 10^{-4}$.

Імовірність пожежі, пов'язаної із замиканням струмоведучих частин вусорі-зної пилки, реалізується при виконанні наступних умов: пробой ізоляції, несправ-них запобіжних обладнаннях, наявності в приміщенні легкозаймистих речовин:

$$P(1) = 0,001 \cdot 0,001 \cdot 0,03 = 3 \cdot 10^{-8}.$$

Якщо не враховувати збиток, заподіюваний можливою пожежею, то мо-жна побачити, що даний ризик значно нижче пропонованого Технічним регла-ментом значення ($1 \cdot 10^{-6}$).

Ідентичні значення виходять при обліку можливого збитку:

$$R(1) = 0,00000003 \cdot 60109 = 0,0018 \text{ грн./год.};$$

Розраховується ризик для інших елементів системи:

$$R(2) = 0,05 \cdot 40681 = 2034,0 \text{ грн./год};$$

$$R(3) = 0,03 \cdot 1220430 = 36612,9 \text{ грн./год};$$

$$R(4) = 0,001 \cdot 385230 = 3852,3 \text{ грн./год};$$

$$R(5) = 0,12 \cdot 122043 = 14645,1 \text{ грн./год};$$

$$R(6) = 0,12 \cdot 122043 = 4474,9 \text{ грн./год};$$

$$R(7) = 0,02 \cdot 40681 = 813,6 \text{ грн./год}.$$

Видне, що за припустимий ризик виходить лише $R(2)$.

Імовірність травмування працівника:

$$P(B) = P(2) + P(3) + P(4) - P(2) \cdot P(3) - P(3) \cdot P(4) - \\ - P(4) \cdot P(2) + P(2) \cdot P(3) \cdot P(4);$$

$$P(B) = 0,07915 ;$$

$$P(B) = P(5) + P(6) + P(7) - P(5) \cdot P(6) - P(6) \cdot P(7) - \\ - P(7) \cdot P(5) + P(5) \cdot P(6) \cdot P(7);$$

$$P(B) = 0,23 ;$$

$$P(A) = P(B) + P(1) - P(B) \cdot P(1) - P(B) \cdot P(1) - \\ - P(1) \cdot P(B) + P(B) \cdot P(1) \cdot P(1);$$

$$P(A) = 0,29;$$

Ризик усієї системи і її складових частин:

$$P(B) = 0,07915 \cdot (122043 + 385230 + 40681) = 13030,7 \\ - P(4) \cdot P(2) + P(2) \cdot P(3) \cdot P(4) \text{ руб./год};$$

$$P(B) = 0,23 \cdot (122043 + 40681 + 40681) = 46783 \text{ руб./год};$$

$$P(A) = 0,29 \cdot (1220430 + 385230 + 40681 + 122043 + 40681 + 40681 + 60109) = \\ = 235325 \text{ руб./год};$$

$$235325 > 30000;$$

$$R(A) > R_{\text{дон}}.$$

Розроблений захисний кожух, який дозволяє не тільки знизити рівень шуму верстата, але й виключити можливість одержання механічної травми $R(B)$, у результаті величина ризику $R(A)$ знижується до рівня:

$$R(A') = P(1) + P(B) - P(1) \cdot P(B) = 0,079;$$

$$R(A) = 0,079 \cdot 366506 = 28954. \quad R(A) = 0,079 \cdot 366506 = 28954 \text{ грн./год.}$$

Зниження рівня ризику:

$$\Delta R = R_{\text{початкове}} - R_{\text{досягнуте}} = 235325 - 28954 = 206371 \text{ грн./рік.}$$

З урахуванням цієї обставини робота з вусорізною пилкою стане безпечною: $28954 < 30000$; $R(A') < R_{\text{дон.}}$

При аналізі ризику без обліку збитку виходить наступний результат:

$R(A) = 0,079 > 0,01$ – робота з вусорізною пилкою вважається особливо небезпечною.

Різноманітність у висновках обумовлене відмінністю складових факторів:

- уніфікується збиток: у розрахунках ідентичним ухвалюється збиток як від опіку, так і від перелому і т.д.;
- імовірність події значно варіюється залежно від розглянутого періоду часу. У цьому випадку $T = 2085$ год (1 рік).

2.7 Аналіз ризику вальців

2.7.1 Аналіз надійності вальців методом побудови «дерева несправностей»

Надійність машин і механізмів визначається ймовірністю порушення нормальної роботи встаткування. Такого роду порушення можуть з'явитися причиною аварій, травм. Велике значення в забезпеченні надійності має міцність конструктивних елементів. Конструкційна міцність машин і агрегатів визначається характеристиками міцності як матеріалу конструкції, так і його з'єднань (зварені шви, заклепки, штифти, шпонки, нарізні сполучення), а також умовами їх експлуатації (наявність мастильного матеріалу, корозія під дією навколишнього середовища, наявність надмірного зношування і т.д.).

Для забезпечення надійної роботи машин і механізмів має немаловажне значення наявність необхідних контрольно-вимірювальних приладів і обладнань автоматичного керування й регулювання. При неспрацьовуванні автоматики надійність роботи технологічного встаткування визначається ефективністю дій обслуговуючого персоналу.

Однак, згідно [1], основним моментом при аналізі надійності є процес керування ризиком, який охоплює різні аспекти роботи з ризиком, від ідентифікації й аналізу ризику до оцінки його допустимості й визначення потенційних можливостей зниження ризику за допомогою вибору, реалізації й контролю відповідних керуючих дій. Аналіз ризику являє собою структурований процес,

метою якого є визначення як імовірності, так і розмірів несприятливих наслідків досліджуваного дії, об'єкта або системи.

При оцінці надійності більшості виробів у техніку доводиться розглядати їх як системи. Складні системи діляться на підсистеми.

Системи з позиції надійності можуть бути послідовними, паралельними й комбінованими.

Багато систем складаються з елементів, відмови кожного з яких можна розглядати як незалежні. Такий аналіз досить широко застосовується по відмовах функціонування й іноді як перше наближення по параметричних відмовах.

Системи можуть включати елементи, зміна параметрів яких визначає відмова системи в сукупності або навіть впливає на працездатність інших елементів. До цієї групи ставляться більшість систем при точному розгляді їх по параметричних відмовах.

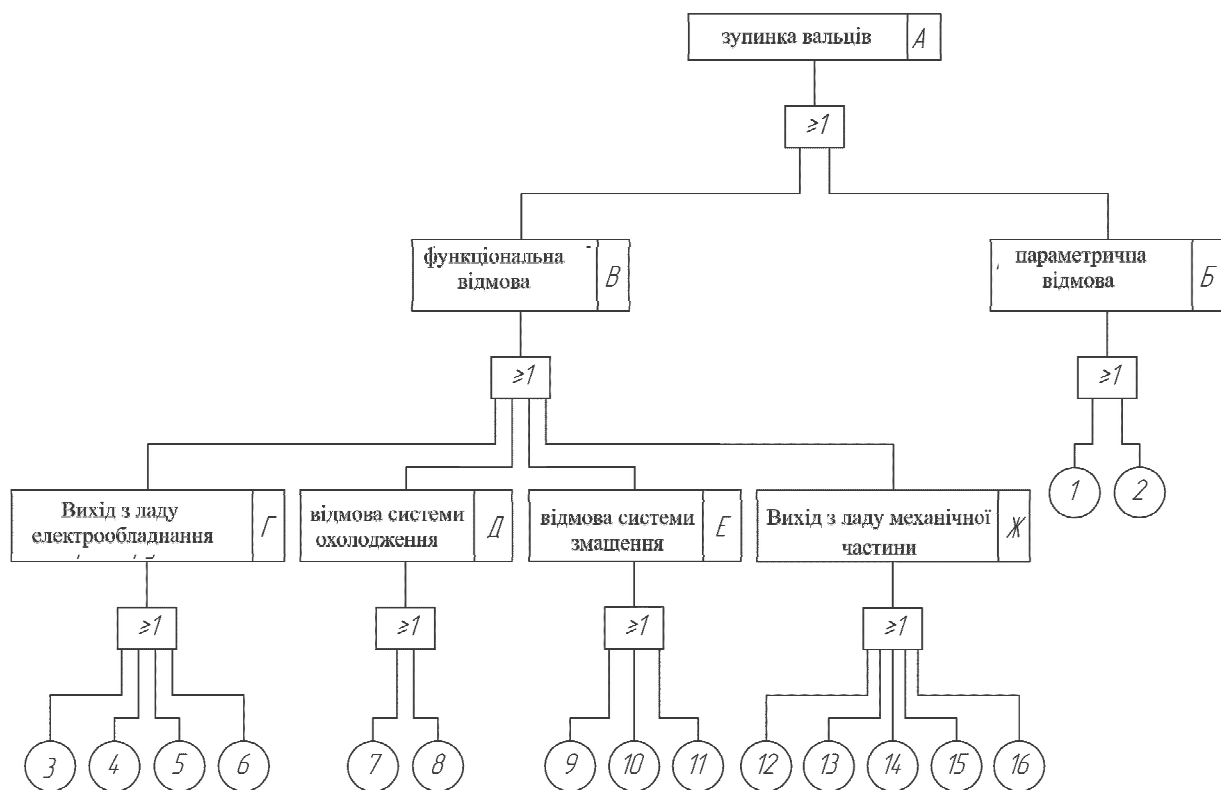


Рисунок 2.17 – «Дерево несправностей» вальців:

A – зупинка вальців; Б – параметрична відмова; В – функціональна відмова;

Г – відмова електроустаткування; Д – відмова системи охолодження;

Е – відмова системи змащення; Ж – відмова механічної частини; 1 – низький рівень охолодної рідини; 2 – зміна тиску охолодної рідини; 3 – відмова електродвигуна; 4 – коротке замикання кабелю на землю; 5 – відмова запобіжника; 6 – коротке замикання на корпус; 7 – відмова насоса; 8 – втрата герметичності системи охолодження; 9 – відмова насоса; 10 – відмова живильника; 11 – втрата герметичності системи змащення; 12 – відмова муфти головного приводу; 13 – відмова зубчастих коліс коробки швидкостей; 14 – відмова редуктора механізму розсування; 15 – відмова гальма; 16 – зношування ножів

Для визначення причин виникнення відмов на виробничому встаткуванні застосовується метод побудови «дерева несправностей». Будується «дерево несправностей» (рисунок 2.17) для встаткування – вальців. Устаткування розглядається в період нормальної експлуатації, тобто при $\lambda = \text{const}$. Дані по інтенсивності відмов наведені в таблиці 2.16.

Відмова верстата може відбутися через функціональну відмову, що з'явилася наслідком раптових відмов блоків, вузлів, деталей, або через параметричну, яка може відбутися в трьох випадках:

- низький рівень охолодної рідини веде до перегріву встаткування й, як наслідок, до виходу його з ладу;
- недостатній тиск охолодної рідини веде до перегріву встаткування;
- зміна тиску у бік збільшення може привести до відмови фланців, клапанів, у результаті чого може відбутися витікання охолодної рідини й перегрів устаткування.

Таблиця 2.16 - Інтенсивність відмов

Позиція	Найменування відмови	Інтенсивність відмов λ , год ⁻¹
1	Низький рівень охолодної рідини	$1,6 \cdot 10^{-7}$
2	Зміна тиску охолодної рідини	$2,3 \cdot 10^{-7}$
3	Відмова електродвигуна	$3,1 \cdot 10^{-6}$
4	Коротке замикання кабелю на землю	$3 \cdot 10^{-7}$
5	Відмова запобіжника	$1,1 \cdot 10^{-5}$
6	Коротке замикання на корпус	$3 \cdot 10^{-7}$
7	Відмова насоса системи охолодження	$1,12 \cdot 10^{-6}$
8	Втрата герметичності системи охолодження	$3 \cdot 10^{-6}$
9	Відмова насоса системи змащення	$1,12 \cdot 10^{-6}$
10	Відмова живильника	$2,2 \cdot 10^{-6}$
11	Втрата герметичності системи змащення	$3 \cdot 10^{-6}$
12	Відмова муфти головного приводу	$2 \cdot 10^{-8}$
13	Відмова зубчастих коліс коробки швидкостей	$2 \cdot 10^{-9}$
14	Відмова редуктора механізму розсування	$1,3 \cdot 10^{-9}$
15	Відмова гальма	$3 \cdot 10^{-6}$
16	Зношування ножів	$2 \cdot 10^{-6}$

Рішення:

$$P(\tau) = \exp\left(-\int_0^{\tau} \lambda(\tau) dt\right) = \exp(-\lambda \tau).$$

$$P_1 = e^{-1,6 \cdot 10^{-7} \cdot 15000} = 0,997;$$

$$P_9 = e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,983;$$

$$P_2 = e^{-2,3 \cdot 10^{-7} \cdot 15000} = 0,996;$$

$$P_{10} = e^{-2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,967;$$

$$P_3 = e^{-3,1 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,95;$$

$$P_{11} = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,956;$$

$$P_4 = e^{-3 \cdot 10^{-7} \cdot 15000} = 0,995;$$

$$P_{12} = e^{-2 \cdot 10^{-8} \cdot 15000} = 0,9997;$$

$$P_5 = e^{-1,1 \cdot 10^{-5} \cdot 15000} = 0,847;$$

$$P_{13} = e^{-2 \cdot 10^{-9} \cdot 15000} = 0,9999;$$

$$P_6 = e^{-3 \cdot 10^{-7} \cdot 15000} = 0,995;$$

$$P_{14} = e^{-1,3 \cdot 10^{-9} \cdot 15000} = 0,9999;$$

$$P_7 = e^{-1,12 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,983;$$

$$P_{15} = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,956;$$

$$P_8 = e^{-3 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,956;$$

$$P_{16} = e^{-2 \cdot 10^{-6} \cdot 15000} = 0,97.$$

Знайти ймовірності відмови й безвідмовної роботи кожної з підсистем:

$$Q_G = 1 - P_3 \cdot P_4 \cdot P_5 \cdot P_6 = 1 - 0,95 \cdot 0,995 \cdot 0,847 \cdot 0,995 = 0,2;$$

$$P_G = 1 - Q_G = 1 - 0,2 = 0,8;$$

$$Q_D = 1 - P_7 \cdot P_8 = 1 - 0,983 \cdot 0,956 = 0,06;$$

$$P_D = 1 - Q_D = 1 - 0,06 = 0,94;$$

$$Q_E = 1 - P_9 \cdot P_{10} \cdot P_{11} = 1 - 0,983 \cdot 0,967 \cdot 0,956 = 0,09;$$

$$P_E = 1 - Q_E = 1 - 0,09 = 0,91;$$

$$Q_{Ж} = 1 - P_{12} \cdot P_{13} \cdot P_{14} \cdot P_{15} = 1 - 0,9997 \cdot 0,9999 \cdot 0,9999 \cdot 0,956 = 0,044;$$

$$P_{Ж} = 1 - Q_{Ж} = 1 - 0,044 = 0,956;$$

$$Q_B = 1 - P_G \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_{Ж} = 1 - 0,8 \cdot 0,94 \cdot 0,91 \cdot 0,956 = 0,345;$$

$$P_B = 1 - Q_B = 0,655;$$

$$Q_B - 1 - P_1 \cdot P_2 = 1 - 0,997 \cdot 0,996 = 0,007;$$

$$P_B = 1 - Q_B = 0,993.$$

Імовірність відмови вальців рівна:

$$Q_A = 1 - P \cdot P_B = 1 - 0,993 \cdot 0,655 = 0,65.$$

2.7.2 Аналіз ризику травмування вальцювальника

У п. 2.6.2 вказувалося, що метою оцінки ризику є усунення професійних ризиків. З врахуванням того, що мета є практично недосяжною, зусилля спрямовують на зменшення й забезпечення контролю ризику, що залишився. Проробляючи дану послідовність дій багаторазово й застосовуючи накопичений досвід, ризик зменшують або усувають.

Оцінку ризику необхідно організовувати й застосовувати для того, щоб допомогти роботодавцям або персонам, що контролюють вироблену роботу:

- визначити погрози, наявні в робочому процесі, і оцінити пов'язані з ними ризики, щоб, дотримуючи вимоги чинного законодавства, визначити, які заходи необхідно здійснити для забезпечення безпеки й схоронності здоров'я працівників і інших осіб;

- оцінити ризик, щоб, ґрунтуючись на отриманій інформації, правильно організувати роботу, вибрати необхідні для роботи встаткування, хімічні речовини, матеріали й т.п.;

- перевірити, чи адекватні здійснювані заходи охорони праці;
- визначити пріоритети діяльності, якщо в результаті оцінки була встановлена необхідність у подальших заходах;
- показати працівникам і їх представникам, що всі фактори, пов'язані з роботою, враховані, а також прийняті всі необхідні заходи для організації безпечної праці;
- забезпечити поліпшення здоров'я й підвищення рівня безпеки працюючих за допомогою превентивних заходів, методів і приймань роботи, які були визнані необхідними й впроваджені після проведення оцінки ризиків.

Для абсолютної оцінки небезпеки технологічних процесів і операцій, відповідно до прийнятої практики, можна рекомендувати наступну класифікацію травмонебезпеки згідно таблиці 2.17.

Таблиця 2.17 - Класифікація умов праці при професійній діяльності

Клас	Умови професійної діяльності	Ризик*	Ризик**
I	Безпечні (оптимальні)	$< 0,7$	$< 10^{-4}$
II	Відносно безпечні (припустимі)	$0,7-0,8$	$10^{-4}-10^{-3}$
III	Небезпечні	$> 0,8$	$> 10^{-3}$

* Відповідно до методу напівкількісної оцінки ризику [9].

** Відповідно до методу, заснованого на аналізі статистичних даних [12].

Математично ризик (R) можна виразити формулою

$$R = Q \cdot p,$$

де Q – імовірність події; p – вага події.

Вага події (p) визначалася виходячи з аналізу журналу реєстрації нещасних випадків і актів форми Н-1.

Основна проблема при оцінці професійного ризику – відсутність єдиної методики, яка була б доступна інженерові й при цьому давала б реальний результат. У даному прикладі аналіз ризику травмування вальцювальника проводиться методом побудови «дерева ризиків» (рисунок 2.18).

Для оцінки величини ризику травмування вальцювальника використаний метод напівкількісної оцінки ризику по дев'ятибальній системі (таблиця 2.18).

Таблиця 2.18 – Напівкількісна оцінка ризику по дев'ятибальній системі

Імовірність Q	Ступінь важкості p
9 – майже обов'язково	9 – смерть
8 – дуже можливо	8 – інвалідність 1-ї групи
7 – можливо	7 – інвалідність 2-ї групи
6 – більше чим випадковість	6 – інвалідність 3-ї групи
5 – випадковість	5 – втрата працездатності більш ніж на 4 тижні
4 – менше ніж випадковість	4 – втрата працездатності менш чим на 4 тижні
3 – малоімовірно	3 – втрата працездатності до 4 днів
2 – дуже малоімовірно	2 – невеликі поранення
1 – практично неможливо	1 – поранень немає

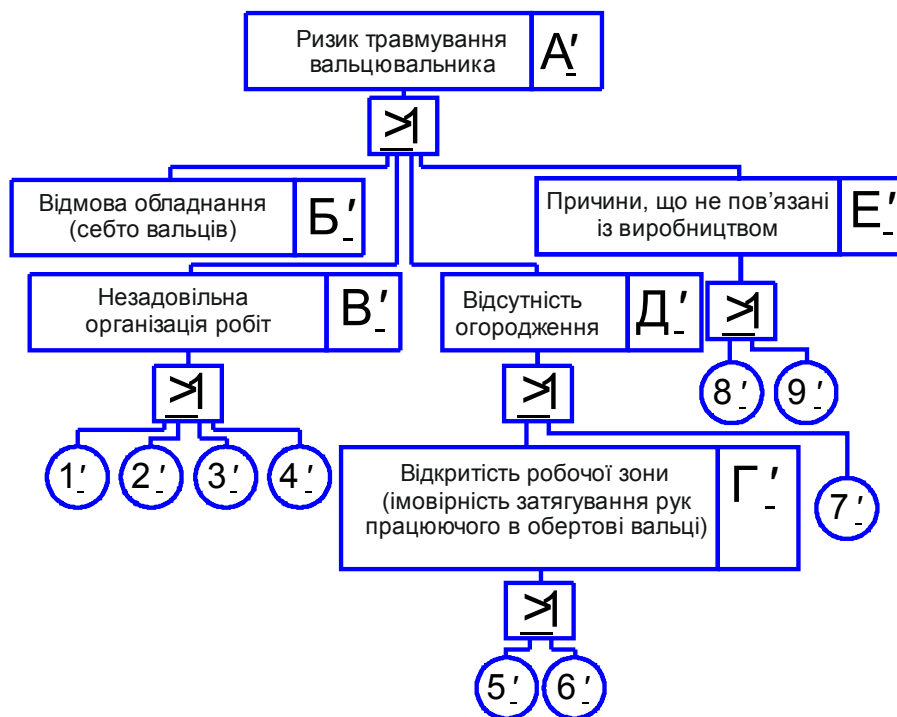


Рисунок 2.18 – «Дерево ризиків» заподіяння збитку здоров'ю вальцювальника гумових сумішей:

A' – ризик травмування вальцювальника; B' – відмова встаткування (вальців); V' – незадовільна організація робіт; G' – відкритість робочої зони (імовірність затягування рук працюючого в обертів вальці); D' – відсутність огороження; E' – причини, не пов'язані з виробництвом; $1'$ – порушення вимог безпеки й охорони праці; $2'$ – недоліки в навчанні безпечним прийманням роботи; $3'$ – недосконалість ергономіки; $4'$ – невідповідність умов праці вимогам охорони праці (наприклад, недостатнє освітлення); $5'$ – клейкість використовуваного матеріалу; $6'$ – використання ручного різального інструменту; $7'$ – відсутність огороження на механізмах, використання яких сполучено з роботою на вальцях; $8'$ – різке погіршення стану здоров'я працюючого; $9'$ – надзвичайні ситуації

Максимальна кількість балів, яку можна одержати при розрахунках ризику по цьому методу, – 81, тому отримані значення переводяться у відсотки виходячи із пропорції 81 бал = 100 %.

Рішення:

$$R = Q \cdot p.$$

Знайти ризик травмування в кожному випадку:

$$R(B') = 2 \cdot 5 = 10 \text{ балів} = 12,3 \% = 0,123;$$

$$R(1') = 8 \cdot 5 = 40 \text{ балів} = 49,4 \% = 0,494;$$

$$R(2') = 7 \cdot 6 = 42 \text{ балів} = 51,9 \% = 0,519;$$

$$R(3') = 7 \cdot 4 = 28 \text{ балів} = 34,6 \% = 0,346;$$

$$R(4') = 8 \cdot 7 = 56 \text{ балів} = 69,1 \% = 0,691;$$

$$R(5') = 8 \cdot 5 = 40 \text{ балів} = 49,4 \% = 0,494;$$

$$R(6') = 8 \cdot 5 = 40 \text{ балів} = 49,4 \% = 0,494;$$

$$R(7') = 5 \cdot 5 = 25 \text{ балів} = 30,9 \% = 0,309;$$

$$R(8') = 3 \cdot 7 = 21 \text{ бал} = 25,9 \% = 0,259;$$

$$R(9') = 2 \cdot 9 = 18 \text{ балів} = 22,2 \% = 0,222.$$

$$R = \prod_{i=1}^n (1 - R_i).$$

Визначити ризик травмування в кожній підсистемі до впровадження заходів щодо поліпшення умов праці на робочому місці вальцювальника гумових сумішей:

$$\begin{aligned} R(B') &= (1 - R(1')) \cdot (1 - R(2')) \cdot (1 - R(3')) \cdot (1 - R(4')) = \\ &= (1 - 0,494) \cdot (1 - 0,519) \cdot (1 - 0,346) \cdot (1 - 0,691) = 0,05; \\ R(\Gamma') &= (1 - R(5')) \cdot (1 - R(6')) = (1 - 0,494) \cdot (1 - 0,494) = 0,26; \\ R(D') &= (1 - R(\Gamma')) \cdot (1 - R(7')) = (1 - 0,26) \cdot (1 - 0,309) = 0,51; \\ R(E') &= (1 - R(8')) \cdot (1 - R(9')) = (1 - 0,259) \cdot (1 - 0,222) = 0,59; \\ R(A') &= (1 - R(B')) \cdot (1 - R(B')) \cdot (1 - R(D')) \cdot (1 - R(E')) = \\ &= (1 - 0,123) \cdot (1 - 0,05) \cdot (1 - 0,51) \cdot (1 - 0,59) = 0,17. \end{aligned}$$

Після впровадження заходів щодо поліпшення умов праці на робочому місці вальцювальника гумових сумішей виключаються наступні причини травмування:

- 2' – недоліки в навчанні безпечним прийманням роботи;
- 3' – недосконалість ергономіки;
- 4' – невідповідність умов праці вимогам охорони праці (наприклад, недостатнє освітлення);
- 6' – використання ручного різального інструменту.

Отже, ризик травмування зміниться:

$$\begin{aligned} R(B') &= 1 - R(I') = 1 - 0,494 = 0,506; \\ R(\Gamma') &= 1 - R(5') = 1 - 0,494 = 0,506; \\ R(D') &= (1 - R(\Gamma')) \cdot (1 - R(7')) = (1 - 0,506) \cdot (1 - 0,309) = 0,34; \\ R(E') &= (1 - R(8')) \cdot (1 - R(9')) = (1 - 0,259) \cdot (1 - 0,222) = 0,59; \\ R(A') &= (1 - R(B')) \cdot (1 - R(B')) \cdot (1 - R(D')) \cdot (1 - R(E')) = \\ &= (1 - 0,123) \cdot (1 - 0,506) \cdot (1 - 0,34) \cdot (1 - 0,59) = 0,12. \end{aligned}$$

Були зроблений розрахунки надійності методом «дерева несправностей» для вальців, а також розрахунки ризику травмування працюючого методом побудови «дерева ризиків». Як показали розрахунки, система досить надійна. Ризик при роботі на вальцях гумовозмішувальних становить $R = 0,17$. Однак після впровадження заходів щодо поліпшення умов праці на робочому місці вальцювальника гумових сумішей він поменшав до $R = 0,12$, що дозволяє віднести умови професійної діяльності до I класу – безпечні ($R < 0,7$ [9] або $R < 10^{-4}$ [12]).

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ЗА КУРСОМ

1. Які основні об'єкти розглядають у теорії надійності? Приведіть приклади об'єктів.
2. Визначення надійності. Чим характеризується надійність? Що розуміють під імовірністю безвідмовної роботи?
3. Значення надійності в техніці. Приведіть практичний приклад.
4. За допомогою яких властивостей, що проявляються в експлуатації, можна судити про те, наскільки виріб виправдовує надії виготовлювача й споживачів?
5. Призначений ресурс. Середній ресурс. Гамма-процентний ресурс.
6. Класифікація відмов.
7. Параметри нормального розподілу.
8. Термін служби. Строк гарантії. Ресурс.
9. Надійність у період нормальної експлуатації.
10. Надійність у період поступових відмов.
11. Як складається структурна схема безвідмовності виробу?
12. Розрахунки надійності послідовних систем. Як можна підвищити надійність послідовних систем?
13. Розрахунки надійності паралельних систем. чи Надійні паралельні системи?
14. Економічні показники надійності.
15. Аналіз надійності методом «дерева несправностей».
16. Навіщо застосовується резервування? Види резервів. Системи резервування.
17. Методи кількісного аналізу ризику.
18. Економічні методи керування ризиком.
19. Методи аналізу ризику небезпеки й працездатності.
20. Організація досліджень стійкості функціонування об'єкта.
21. Аналіз небезпек і ризику промислового об'єкта.
22. Людський фактор як джерело ризику.
23. Фактори виробничого середовища і їх вплив на безпеку системи «людей – машина».
24. Законодавчі розв'язки, що ставляться до ризику.
25. Економічний аспект ризику.
26. Соціальний аспект ризику.
27. Методи й засоби попередження виробничого ризику людської ланки в системі «людей – машина».
28. Шляхи зниження величини ризику, пов'язаного з експлуатацією виробничого встаткування.
29. Основні положення теорії ризику.
30. Визначення ризику.
31. Прийнятний ризик.
32. Економічні методи керування ризиком.
33. Методи аналізу ризику.
34. Розрахунки ризику.
35. Керування ризиком.
36. Припустимий ризик.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ГОСТ Р 51901.13–2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. – Москва.: Стандартинформ, 2005. – 16 с.
2. ГОСТ 12.1.004–91. Пожарная безопасность. Общие требования. – Москва.: Госстандарт СССР, 1992. – 68 с.
3. ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия, термины и определения. – Москва.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам, 1990. – 37 с.
4. РД 26-01-143-83. Надежность изделий химического машиностроения. Оценка надежности и эффективности при проектировании [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.skonline.ru/doc/7966.html>
5. Сердюк В.С. Надежность технических систем и техногенный риск: конспект лекций / В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 86 с.
6. Надежность технических систем и техногенный риск: метод. указания к самостоятельной работе студентов / сост.: В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 89 с.
7. Надёжность технических систем и техногенный риск: метод. указания к выполнению практ. работ / сост.: В.С. Сердюк, А.Б. Корчагин, М.Г. Нинилина. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. – 20 с.
8. Сборник задач по теории надёжности / А.М. Половко [и др.]; под ред. А.М. Половко. – Москва.: Сов. радио, 1972. – 408 с.
9. Лайтинен Х. Пособие по наблюдению условий труда на рабочем месте в промышленности. Система Элмери [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nacot.ru/files/x2.doc>.
10. Металлорежущие станки: учебник / В.Д. Ефремов [и др.]; под ред. П.И. Ящерицына. – 5-е изд., перераб. и доп. – Старый Оскол: ТНТ, 2009. – 696 с.
11. Оценка вероятности возникновения опасных ситуаций: метод. указания / сост. Э.А. Гомзигов. – СПб.: С.-Петербург. речной гос. ун-т водных коммуникаций, 1999. – 15 с.
12. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: федер. закон от 22.07.08 № 123-ФЗ // Рос. газ. – 2008. – 1 авг.
13. Любарская Е. Цена человеческой жизни [Электронный ресурс]. – Москва., 2008. – Режим доступа: <http://lenta.ru/articles/2004/02/18/lifeprice/>, свободный. – Загл. с экрана.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ [2]

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
Механічні елементи			
Гільзи	0,02	0,045	0,08
Диференціали	0,012	1,00	1,58
Затискачі	0,0003	0,0005	0,0009
Кільця змінного перетину	0,045	0,55	3,31
Коробки колінчатого вала	0,1	10,9	11,8
Коробки передач:			
сполучні	0,11	0,2	0,36
секторні	0,051	10,912	1,8
швидкісні	0,087	2,175	4,3
Корпуси	0,03	1,1	2,05
Муфти:			
зчеплення	0,04	10,06	1,1
ковзання	0,07	0,3	0,94
Обмежники	0,165	0,35	0,783
Обмежувальні змінні кільця	-	0,36	-
Противаги:			
більші	0,13	0,3375	0,545
малі	0,005	0,0125	0,03
Пружини	0,004	10,1125	0,221
Приводи:			
зі шківом		0,16	
додаткового сервомеханізму	0,86	12,5	36,6
звичайних сервомеханізмів	0,86	12,5	36,6
більш економічні	0,6	3,3	18,5
менш	0,17	1,8	9,6
Приводні паси передач	-	3,6	-
Підшипники:			
кулькові	0,02	0,65	2,22
сполучних муфт	0,008	0,21	0,42
роликові	0,2	0,5	1,0
Шарикопідшипники:			
потужні	0,072	1,8	3,53
малопотужні	0,035	0,875	1,72
Ресори малопотужні	-	0,112	-
Ролики	0,02	0,075	0,1
З'єднання:			
механічні	0,02	0,02	1,96
обертові	6,89	7,50	9,55
паяні	0,0001	0,004	1,05
Сполучні коробки	0,28	0,4	0,56
Сервомеханізми	1,1	2,0	3,6
Стрижні	0,15	0,35	0,62
Пристрій зв'язку:			1
спрямовані	0,065	1,52	3,21
поворотні	0,001	0,025	0,049
гнучкі	0,027	0,039	1,348
тверді	0,001	0,025	0,049

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
Фільтри механічні	0,045	0,3	1,8
Шестірні	0,002	0,12	0,98
Штанги плунжера	-	0,68	1
Штифти:			
с нарізкою	10,006	0,025	0,1
напрямні	0,65	1,625	2,6
Шарніри універсальні	1,12	2,5	12,0
Шасі	-	0,921	-
Ексцентрики	0,001	10,002	0,004
Пружини	0,09	0,22	0,42
Теплообмінники	2,21	15,0	118,6
Гідравлічні й пневматичні елементи			
Діафрагми	0,1	0,6	0,9
Джерела потужності гідравлічні	0,28	6,1	19,3
Засувки клапанів	0,112	5,1	44,8
Засувки порушення	0,112	0,212	2,29
Клапани:			
кулькові	1,11	4,6	17,7
важільні	1,87	4,6	7,4
навантажені	0,112	5,7	18,94
надшвидкісні	1,33	3,4	5,33
обхідні	0,16	2,2	8,13
стопорні	0,112	2,3	4,7
контрольні	0,24	1,9	2,2
дренажні	-	0,224	-
Наповнювальні	0,1	0,112	1,12
поплашкові	5,6	8,0	11,2
пального	1,24	6,4	37,2
тиску	0,112	5,6	32,5
первинні	0,165	6,3	14,8
двигуна	-	37,2	-
регулятора	-	0,56	-
розвантажувальні:	0,224	5,7	14,1
тиску	0,224	3,92	32,5
термічні	5,6	8,4	12,3
резервуарні	2,70	6,88	10,8
селекторні	3,7	16,0	19,7
регулювальні	0,67	1,10	2,14
ручні перемикаючі	0,112	6,5	10,2
ковзні	0,56	1,12	2,28
повзункові		1,12	
соленоїдні:	2,27	11,0	19,7
Триходові	1,87	4,6	7,41
чотириходові	1,81	4,6	7,22
імпульсні	2,89	6,9	9,76
пропускні	0,26	0,5	2,86
розвантажувальні	3,41	5,7	15,31
Сервоклапани	16,8	30,0	56,0
Манометри	0,135	1,3	15,0
Мотори гідравлічні	1,45	1,8	2,25
Нагнітачі	0,342	2,4	3,57
Насоси з машинним приводом	1,12	8,74	31,3
Поршні гідравлічні	0,08	0,2	0,85

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
Приводи постійної швидкості пневматичні	0,3	2,8	6,2
Прокладки:			
коркові	0,003	0,04	0,077
просочені	0,05	0,137	0,225
зі сплаву «Монель»	0,0022	0,05	0,908
кільцеподібні			0,035
фенолові (пластмасові)	0,01	0,05	0,07
гумові	0,011	0,02	0,03
Регулятори:			
тиску	0,89	4,25	15,98
гідравлічні		3,55	
пневматичні	3,55	7,5	15,98
Резервуари гідравлічні	0,083	0,15	0,27
Сильфони	0,09	2,287	6,1
З'єднання:			
гідравлічні	0,012	0,03	2,01
пневматичні	0,021		
Сполучні муфти гідравлічні		0,56	-
Трубопроводи	0,25	1,1	4,85
Циліндри	0,005	0,007	0,81
Циліндри пневматичні	0,002	0,004	0,013
Шланги:			
високого тиску	0,157	3,93	5,22
гнучкі		0,067	
пневматичні		3,66	

ДОДАТОК Б

ІНТЕНСИВНІСТЬ ВІДМОВ ЗАХИСНИХ ОБЛАДНАНЬ [2]

Найменування елементів	Середнє значення інтенсивності відмов ($\lambda \cdot 10^6$), г^{-1}
Індикатори вибухів автоматичних систем придушення вибухів (АСПВ)	0,25
Блоки керування автоматичних систем придушення вибухів (на кожний канал)	0,12
Гідрогармати ГП (АСПВ)	0,27
Зрошувачі АС (АСПВ)	0,32
Полум'явідсікувачі ПО (АСПВ)	0,39
Кабелі (АСПВ)	0,047
Запобіжні мембрани	0,0112

ДОДАТОК В

ДОВІДКОВІ ДАНІ ПО ІНТЕНСИВНОСТІ ВІДМОВ ДЕЯКИХ ДЕТАЛЕЙ І СКЛАДАЛЬНИХ ОДИНИЦЬ [4]

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
Арматура світлосигнальна	0,1	0,9	1,2
Байонетний затвор	-	5,0	-
Болт - гайка (пари), болт фундаментний	0,03	0,13	5,5
Вал	0,1	0,15	0,72
Вал-Шестірня	0,2	0,25	1,0
Варіатор ланцюгової пластинчастий:			
а) для зубчастих редукторів	-	28,0	-
б) для черв'ячних редукторів	-	50,0	-
Варіатор			
а) типу НІР-50-0,6-2,8 за ГОСТ 5.1521-72	-	2,0	-
б) типу СН-1 і СН1-2-1, ГОСТ 23333-78, ГОСТ 23384-78		5,0	
Вентиль			
а) діафрагмовий емальований із сірого чавуну, ГОСТ 5.1996-73		11,6	
б) запірний мембранний з електромагнітним приводом		16,0	
в) запірний голчастий, ГОСТ 3149-70	-	20,0	
г) запірний з антикорозійної сталі, ГОСТ 22446-77	-	20,0	
д) запірний муфтовий і фланцевий із сірого чавуну, ГОСТ 18722-73		6,0	
е) запірний прямооточний фланцевий чавунний, ГОСТ 13696-68		13,0	
ж) запірний сталевий фланцевий, ГОСТ 19192-73	-	6,0	-
з) запірний кутовий сильфонний, ГОСТ 12884-76	-	71,4	-
и) ртутний металевий (ігнітрон) типу ІВУ-500/4А, ГОСТ 5.1606-72		25,0	
к) муфтовий латунний	-	6,6	-
л) терморегулюючий, ГОСТ 22541-77	-	20,0	-
м) штампований сталевий, ГОСТ 8436-	-	13,0	-
Повітрозбірник ВР-3,2 і ВР-5,0, ГОСТ 5.1803-73	-	27,7	-
Гідророзподільник дроселюючий із плоским поворотним золотником, тест 17698-80		5,0	
Дросель (гідравлічний і пневматичний) Засувка клинова	10	16	73
а) з невисувним шпинделем, ГОСТ 11033-73		20	
б) з висувним шпинделем на $P_y = 1$ МПа ГОСТ 5.2001-73	-	3,2	-
в) з висувним шпинделем на $P_y = 16$ МПа ГОСТ 10194-69	-	3,4	-
г) фланцева, ГОСТ 3437-75	3,2	10	20
Затвор поворотний; Золотник напірний	-	20,3	-
а) типів Г54-22, БГ54-22, ПБГ54-22; ГОСТ 5.1333-72	-	125,0	-
б) типів ПГ54-24, ПБГ54-24, ПВГ54-24, ГОСТ 5.867-71	-	125,0	-
Клапан зворотний	1,1	6,4	13,2
Клапан запобіжний, ГОСТ 10019-74	1	6,3	-
Клапан регулюючий		28	-
Кожух захисний	0,15	0,4	0,6
Колесо зубчасте циліндричне	0,2	0,25	1,0
конічне	0,2	1,2	9,5
Колесо черв'ячне	0,2	1,2	9,5
Кільце ущільнювальне	1	3,0	9,4
Компресор повітряний поршневий загального призначення 202 ВП, ГОСТ 5.28-67	27	33	40
Конденсатовідведення			
а) термодинамічний	-	12	-
б) термодинамічний муфтовий чавунний, ГОСТ 12386-67	-	12	-
в) термостатичний	-	28	-

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
Корпус підшипника	0,16	2,4	9,1
Кран корковий прохідний чепцевий сланцевий і муфтовий чавунний, ГОСТ 19193-73	-	12,6	-
Кран кульовий прохідний фланцевий чавунний	-	14,6	-
Кулачок	1,0	2,4	4,3
Лубрикатор	-	13	-
Манжета	3,8	4,3	6,3
Манометр			
а) МГ-1, що показує	0,13	1,3	15
б) диференціальний, ГОСТ 18140-77	-	70	-
в) диференціальний мембранний типу ДМИ; ГОСТ 5.897-71		31	
Маслюка, ГОСТ 19653-74	-	5,0	
Механізм виконавчий гідравлічний поршневий, ГОСТ 10038-74		10	
Мотор гідравлічний	1,4	4,3	22,5
Муфта			
а) сполучна обертова	0,1	2,5	4,9
б) пружна	2,7	3,9	13,5
в) фрикційна запобіжна	0,7	3,0	9,4
г) електромагнітна	4,5	6,0	9,3
Нагрівальний елемент	1,0	2,0	4,0
Насос			
а) осьовий, ГОСТ 9366-71	-	57	-
б) поршневий	27	43	105
в) ручного густого змащення	9,7	18	53
г) відцентровий багатоступінчастий секційний, ГОСТ 10407-70	10	20	500
д) шестерний	14	18	27
Ніпель	0,1	0,2	2,0
Вісь	1,5	8,5	8,2
Перехідник муфтовий трубний	0,25	1,1	4,8
Пневмоклапан редукційний П-КР12-21	-	6,4	-
Пневморозподільювач			
а) крановий	-	2,0	-
б) трилінійний типів В76-21, В76-21, ІВ76-21, КВ76-21, МВ76-21, ОВ76-21, ГВ76-21, ДВ76-21	9	11	48,5
Пневмопідсилювач, ГОСТ 5.1862-73	-	1,5	-
Пнеumoциліндр, ГОСТ 15608-70	10	22	49
Підшипники кочення	0,3	5,0	10
Поршень	0,8	2,0	5
Запобіжник	3,0	5,0	8,2
Прокладка	0,2	0,3	0,4
Пружини гвинтові циліндричні стиску й розтягання	0,4	1,1	2,2
Пускач			
а) магнітний	3,0	10	16
б) електромагнітний	-	5,2	-
Редуктор тиску ГОСТ 5.1853-73		5,0	
Редуктор			
а) планетарний зубчастий двоступінчастий типорозмірів П 2-31,5, П 2-63, ГОСТ 22916-78	3	40	56
б) типів ЦЦ-115У и ЦД-150М, ГОСТ 5.221-69	-	20	-
в) типу ЦДН-3, ГОСТ 5.235-69	-	31	-
г) типу Ц2В-160-40-12В2	-	60	-
д) циліндричний двоступінчастий крановий Ц2-400, ГОСТ 5.900-71; В2, ГОСТ 5.410-70		27	
е) циліндричний двоступінчастий типорозмірів	31	40	56

Найменування елементів	Інтенсивність відмов $\lambda \cdot 10^{-6}$		
	Нижня межа	Середнє значення	Верхня межа
ЦЭУ-100-Ц2В-250, ГОСТ 20758-75			
ж) черв'ячний, ТУ 2-056-061-72	-	28	-
Ремені приводні передач	-	3,6	-
Рукава гнучкі напірні	0,5	2,0	5,2
Сильфон			
а) багат шаровий металевий, ГОСТ 21744-76	1,0	6,5	13
б) одно шаровий розділовий і компенсаторний з нержавіючої сталі		90	
в) зварений металевий, ГОСТ 21754-76	-	1,0	-
г) безшовний одно шаровий	-	16	-
З'єднання трубопроводів			
а) гідравлічне	0,4	1,2	2,1
б) пневматичне	0,2	1,5	11,5
Станція рідкого змащення, ГОСТ 5.1172-71	-	62	-
Лічильник			
а) рідини кільцевий, ГОСТ 14684-69		52	-
б) рідини з овальними шестірнями, ГОСТ 12671-71		81	-
в) рідини лопатевої, ГОСТ 22548-77		10	-
Тахогенератор магнітоіндукційний типу ТМ		42	-
Тахометр магнітоіндукційний дистанційний типу ТМ		9 0	
Теплообмінник	2,2	15	19
Термометр манометричний, ГОСТ 3624-71	-	8,0	-
Трансформатор постійного струму типу ТПТ	1	1,1	2,3
Трійник трубний	0,25	1,1	4,3
Тягомір, напоромір і тягонапоромір	-	3,0	-
Косинець (коліно). ГОСТ 8946	0,25	1,1	4,8
Рівнемір поплавковий	1,2	5,3	53
Підсилювачі магнітні, ГОСТ 20819-75	1,0	26	50
Фільтр			
а) вологовідділяч повітряний, ГОСТ 17437-72	0,1	8,0	16,2
б) повітря для пневматичних приладів, ГОСТ 14266-69		10	
в) сітчастий лінійний для консистентного змащення, ГОСТ 6918-69		23	
Фланець	0,01	0,25	0,49
Ланцюги приводні роликові й втулкові зубчасті	1,25	5,0	10
Черв'як черв'ячної машини	21	35	116
Черв'як черв'ячних передач	0,02	1,2	9,5
Шарнір універсальний	1,1	2,5	12
Шестірня	0,2	0,25	1,0
Шланг високого тиску	0,16	3,9	5,2
пневматичний	-	3,7	-
Шпилька, шпонка, штифт	0,2	0,4	0,8
Шток	0,8	2,0	8,5
Електрокалорифер	-	6,0	-
Електромагніт ІС	-	2,0	-
Електродвигун			
а) асинхронний	4,5	3,6	11,2
б) синхронний	0,16	0,36	6,2
в) постійного струму	-	9,4	-

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до проведення практичних занять
з дисципліни

**НАДІЙНІСТЬ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ
І ТЕХНОГЕННИЙ РИЗИК**

*(для студентів 4 курсу денної та 5 курсу заочної форм навчання
напряму підготовки 6.170202 – Охорона праці)*

Укладачі: **АБРАКІТОВ** Владимир Едуардович
ГРЯЗНОВА Світлана Аркадіївна

Відповідальний за випуск *Я. О. Серіков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *К. А. Алексанян*

План 2014, поз. 122М

Підп. до друку 26.03.2015р.

Друк на різнографі.

Зам. №

Формат 60×84/16

Ум. друк. арк. 2,8

Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017 р.